# 农业气象学原理

冯秀藻
陶炳炎
主编

气象出版社

# 农业气象学原理

冯秀藻　陶炳炎　主编

气象出版社

（京）新登字046号

## 内 容 简 介

本书从理论上论述了农业气象要素（光、热、水、气）对农业生物生长、发育、产量形成影响的基本理论与规律，以及农业气象模拟与模式研究的基本方法；简要地介绍了农业生物（农作物、林木、牧草与家畜）生长、发育对气象条件的要求与反应，及生产中的主要气象问题。全书取材广泛，内容翔实、新颖，基本反映了当前国内外农业气象原理研究的最新成果。除可作为高等学校农业气象专业的教材外，还可供气象、农、林、牧、生态等专业的业务、科研工作者及高等学校有关专业师生参考、学习之用。

农 业 气 象 学 原 理
冯秀藻　陶炳炎　主编
责任编辑　殷　钰
*
气象出版社 出版
（北京西郊白石桥路46号）

北京昌平环球科技印刷厂印刷
新华书店总店科技发行所发行　全国各地新华书店经销
*
开本：850×1168 1/32　印张：14.25　字数：366千字
1991年9月第一版　1991年9月第一次印刷
印数：1—1500　定价：4.60元
ISBN 7-5029-0666-5/P·0358（课）

# 前　言

农业气象学是随着农业的发展而产生的、旨在为农业生产服务的应用性学科。正当全国突出地强调农业的基础地位以及农业发展必须依靠科学（包括农业气象学）之时，出版本书，能为我国农业水平的提高贡献绵薄之力，正是笔者几十年从事农业气象工作孜孜追求的目标。

农业气象原理是农业气象学的重要组成部分，是农业气象学专业的主要课程之一。它主要论述了农业气象要素（光、热、水、气）对农业生物生长发育、产量形成影响的基本理论与规律，并为农业气象专业及有关农业学科专业的后继课程打下必要的基础。全书共九章：第一章从农业生产与气象条件关系入手，阐述农业气象学的概念、目的、任务以及国内外农业气象学的发展；第二、三、四、五章分别阐述了光、热、水、气等农业气象要素对农业生物的一般影响及不利条件的危害；第六章主要介绍了农业气象系统分析与农业气象模式建立的基本方法；第七、八、九章则从农业生产对象（即农业生物）角度，分别论述了农作物（水稻、小麦、棉花、油菜等）、林木、牧草与家畜生长发育的气象条件与生产中主要的气象问题。我们在编写中力求内容翔实、新颖，能反映当前水平。

七十年代以来，国内外农业气象研究进展较快，最为突出的就是土壤—植物—大气系统(或农业气象系统)中物质与能量传输的研究及农业气象模拟、模式的研究，现虽未臻十分成熟，但成果颇丰，尽可能的吸收这方面的成果，并整理出农业气象模式一章，是本书的一个特点。近年来我国农业气象工作的一个明显拓宽，就是将研究对象由单一的种植业扩展到“大农业、大粮食”。

为了适应这一变化，我们尝试着在不影响原来主要内容的情况下，增加了作物气象、林业气象、畜牧气象等方面的内容，此为本书的另一特点。

本书是在我院历年《农业气象学》教材基础上修改而成，因而它是众多同志辛勤劳动的结晶，最后的修改稿由四位同志完成。其中第一、二、八章由冯秀藻完成；第四、六、七章由陶炳炎完成；第五章由王华松完成；第三、九章由闵庆文完成。最后由冯秀藻（主编）、陶炳炎(副主编)审定。李莉参加了第二、四章的部分修改。曾担任该课教学的陈玉麟、吴涛、张正元、王生明、谈红宝等同志，都提出过不少有益的意见并做了不少工作，特此致谢。

限于水平，书中会有不当乃至谬误之处，敬请读者指正。

编著者

1990年5月，于南京

# 目　　录

第一章　绪论……………………………………………………（ 1 ）
§1　农业生产与自然环境…………………………………………（ 1 ）
§2　农业气象学的定义及其研究对象……………………………（ 6 ）
§3　农业气象学的诞生与发展……………………………………（ 9 ）
参考文献 ……………………………………………………………（15）
第二章　太阳辐射与农业生产……………………………………（ 17 ）
§1　光的生物学意义与植物的光学特性…………………………（ 17 ）
§2　光合有效辐射…………………………………………………（ 28 ）
§3　光照长度对植物的影响………………………………………（ 32 ）
§4　光照强度及其对植物的影响…………………………………（ 45 ）
§5　不同光谱对生物的影响………………………………………（ 57 ）
§6　光能利用率及其提高…………………………………………（ 60 ）
参考文献……………………………………………………………（ 71 ）
第三章　热量条件与农业生产……………………………………（ 72 ）
§1　温度的农业意义及温度指数的概念…………………………（ 72 ）
§2　温度强度及其对农业生物的影响……………………………（ 86 ）
§3　温度的累积及其对农业生物的影响——
积温学说及其应用……………………………………………（ 94 ）
§4　温度的周期性变化及其对农业生物的影响…………………（116）
§5　不利温度条件对农业生物的影响及其调节…………………（127）
参考文献……………………………………………………………（151）
第四章　水分与农业生产…………………………………………（153）
§1　水的农业意义…………………………………………………（153）
§2　土壤—植物—大气水分循环系统……………………………（155）
§3　土壤—植物—大气水分传输…………………………………（169）
§4　水分与作物的生长发育及产量形成…………………………（181）

§5 不利水分条件对农业生产的影响及其调节…………………(201)
参考文献……………………………………………………………(211)
第五章 空气、风与农业生产……………………………………(212)
§1 碳、氮、氧的循环及对植物的影响…………………………(212)
§2 大气污染与植物………………………………………………(233)
§3 风与植物………………………………………………………(246)
参考文献……………………………………………………………(254)
第六章 农业气象模式……………………………………………(256)
§1 概述……………………………………………………………(256)
§2 农业气象模式的研究方法……………………………………(263)
§3 作物气象模式…………………………………………………(279)
参考文献……………………………………………………………(291)
第七章 作物气象…………………………………………………(293)
§1 水稻气象………………………………………………………(293)
§2 小麦气象………………………………………………………(311)
§3 棉花气象………………………………………………………(323)
§4 油菜气象………………………………………………………(335)
参考文献……………………………………………………………(346)
第八章 林业气象…………………………………………………(348)
§1 树木、森林生长发育与气象条件……………………………(349)
§2 营林与气象……………………………………………………(371)
§3 林业气象灾害…………………………………………………(379)
参考文献……………………………………………………………(392)
第九章 畜牧气象…………………………………………………(394)
§1 草原、牧草与气象……………………………………………(394)
§2 家畜生产与气象………………………………………………(420)
§3 畜牧气象灾害…………………………………………………(439)
参考文献……………………………………………………………(446)

# 第一章 绪 论

## §1 农业生产与自然环境

### 一、生物有机体生长发育和产量形成

生物体的全部生命过程，既存在它内部生命活动的矛盾，也存在它与外界自然环境的矛盾，还存在人类活动与它所处的自然环境的矛盾。这些矛盾构成一个辩证的统一整体。生物体的生命活动就是这些矛盾作用下的结果。

生物有机体发展的内因充满着各种矛盾，同化与异化则是基本矛盾，贯穿于生命活动的始终。从有机体生命过程的总趋势看，同化作用又构成矛盾的主要方面，正是这样，生物有机体才能不断长大、增重、成熟、繁殖后代。生物有机体的内部矛盾决定着它的发展方向、性质和速度，决定着其一生中所需要的外界自然条件。而一切外部矛盾又必须通过内部矛盾才能起作用。因此生物有机体内部矛盾是它生长发育和产量形成的根据。

生物有机体生长发育的外因也是一个复杂的外部矛盾的总体。既有不同的外界自然因子如土壤、气候、地形地势等与生物有机体的矛盾；又有外界人为因素如农业措施、社会经济条件等与其生育的矛盾。而在气候条件中，又有光、热、水、气等因子与它的矛盾。外部矛盾是生物体发展的条件，它和内部矛盾一起，影响生物体发展的进程，参与决定生物体发展的性质和方向。但是外部矛盾在一定条件下，也可对生物有机体的生育起决定的作用。例如，当外界条件出现了超过生物体所能适应的限度时，外部原因常能起决定作用。又如生物有机体的能量与物质是从环境中摄取的，因此，不具备其所需的外因，生物体仍然不能生长、发育。

认识生物有机体内因与外因的辩证关系，当然不限于研究它们之间的规律，更主要的是在于认识这种规律，去能动地改造生物有机体，改造外界自然环境与条件，使它们朝着人们需要的方向发展。栽培植物和饲养动物就是在人类参与下进行生命活动的例子。

人的主观能动性对农业生产的作用就在于认识生物有机体发展的进程和所需要的外界条件，以便合理布局农业，有效地利用自然资源；就在于研究生物有机体和各种不利于它们的外界条件如旱涝、低温、冷害、病虫等之间的矛盾，以便采取措施防御它们；就在于有意识地改变和控制它们的生活条件，使之朝着人们需要的方向发展，生产出更加满足人们要求的产品。

人们的主观能动性对农业生产的这些作用，便成为农业气象学的目的与任务的根本依据。生物有机体内因与外因的辩证关系是农业气象实践中的理论基础。

## 二、农业生产与气象条件

在影响农业生产的外界自然环境的诸因子中，气象因子是十分重要的。它是动植物生活所必需的基本因子。

气象条件影响农业生产，首先它作为自然资源为第一性生产和第二性生产直接或间接地提供它们所需要的能量与物质，生物体如不从大气中摄取光、热、二氧化碳和从土壤中获取水分与营养物质，便不可能有生命活动。其次，农业生物的生命过程既然在外界自然环境中完成，就必然受到气象条件的有利和不利的影响。即使今后农业生产技术达到了极高的水平，人们还是要根据以至控制外界气象条件取得最优方案来安排生产的。其三，通过气象条件对外界其他因子如土壤、水文、地形地势、地面覆盖物的作用，从而又对气象条件的反馈来影响农业生产。其四，气象条件中光、热、水、气等因子的不同组合对农业生产会有不同的影响，不利的组合将导致农业减产，有利的组合必使农业增产，而其最佳组合，则会使农业获得更好的收成。

正是由于生物体深受气象条件的制约，可以这样说，在一定的生产水平下，植物以及动物的分布又几乎都由气候条件所决定。因此农业生产的一个特点就是地域性和季节性都很强。不同生物要求不同的土壤、气候条件；同一生物不同生长发育时期要求的天气气候条件也不尽同；就是同一生物不同品种要求的环境条件也有差异。发展农业生产，必须"因时因地制宜"。所谓时，实际是指气象条件，说明气象条件对农业生产的重要意义。

农业生产特别是生产过程中的一些农业技术措施，也会反过来影响气象条件。生物有机体的不同生育时期形成不同的农业小气候条件；人们的生产活动，又是形成农业小气候条件的主要因素。因此，人们的各项针对性的农业措施，不仅能有效地利用农业小气候资源，而且能改善不利的农业小气候条件，从而促进农业高产丰收。

我国农业生产的优良传统之一，就是推行精耕细作技术体系，这也是我国农业生产的一个显著特点。在实现我国农业现代化时，这个特点还必须保持和发扬。精耕细作就是在人们的作用下，让动植物"吃饱、喝足、居住舒服"，为它们安排一个适宜的生长发育环境。这个环境是它们所需要的光、热、水、气和营养物的综合。精耕细作的主要内容有深耕改土、增施肥料、建设农田水利工程、改良品种、合理密植、防治病虫害以及间作套种、复种多熟、保护地栽培、多种经营等。要充分发挥这些措施的功能，几乎无一不与天气气候条件有关，有些措施，在某些情况下，如不考虑气象因素，不仅发挥不了作用，甚至会得到相反的效果。

农业生产对象有其自身的生长发育规律、气象条件也有它自己的变化规律。我国幅员广大，气候资源丰富多彩，对发展农林牧副渔各业生产极为有利，生产的气候潜力巨大；但各种气象灾害又不同程度、不同时、空尺度地频繁发生，常给农业生产带来危害。这就看出，农业生产对象的生育规律和天气、气候变化规律相结合所形成的农业气象规律，有时会有利于农业生产，使农业丰产

丰收；有时又会不利于农业生产，使农业减产歉收。因此，要搞好农业生产，必须掌握和遵循农业气象规律，作到"趋利战害"。

### 三、土壤—植物—大气系统

农业生产是一个有机联系的复杂系统。它以生物体为生产对象，以具有一定的生态系统的自然环境为其生产场所。农业生产过程是对气候、土壤、地形、生物等自然资源综合利用、调节与改造的过程。农业自然资源是可以更新的，只要合理利用，就可以在不断地把它转化为农业产品的同时，得到恢复与更新，形成一个有效的循环系统，持续地为人类提供农产品。当然，这个系统还应加上经济因素、技术因素、农业政策等才能最后形成高产、优质、低耗、多品种、高效益的农产品，可称之为农业生产系统。

实际上生物有机体所处的外界环境，在生物体上下边界层之

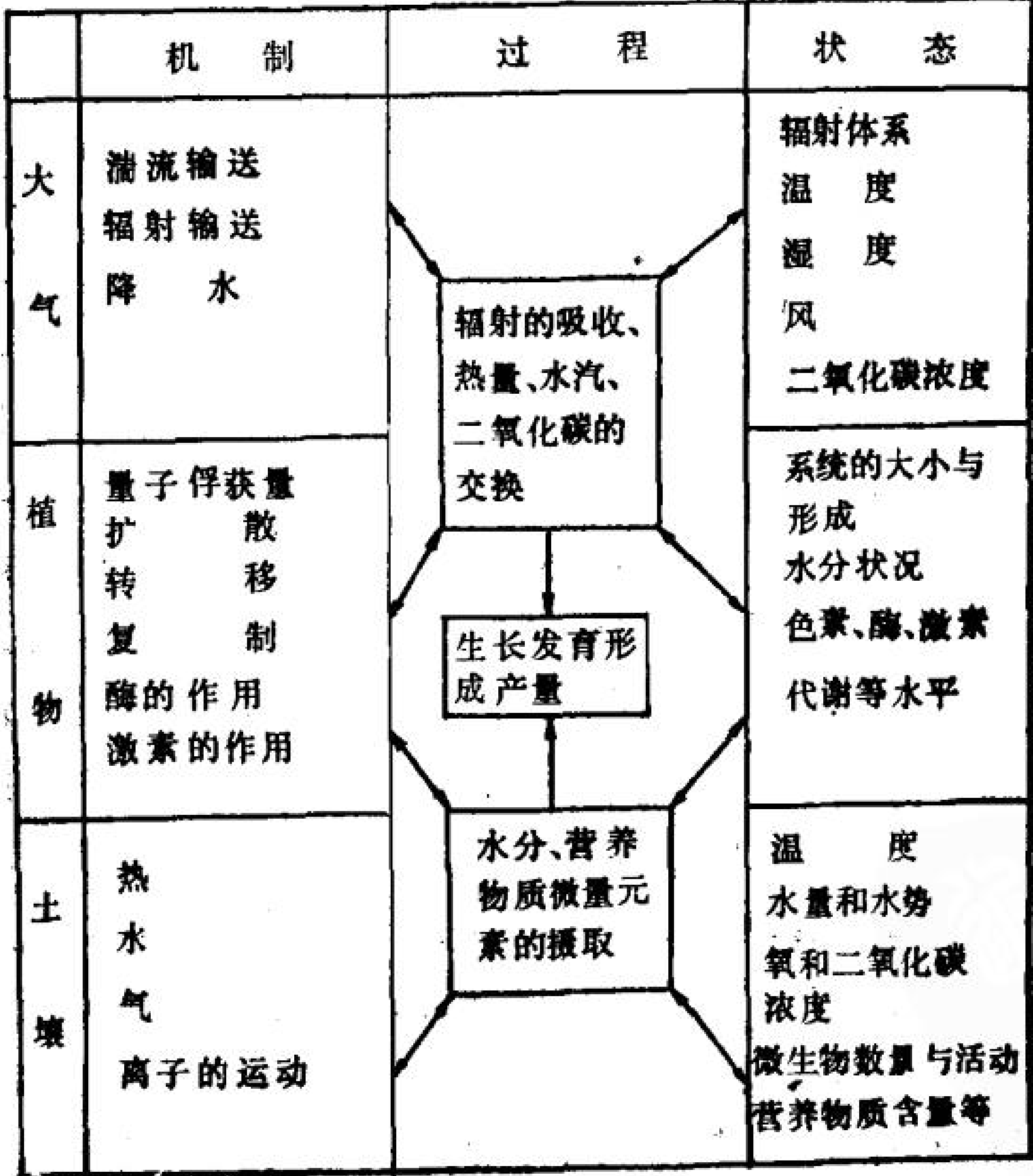



图1.1 土壤—作物—大气系统示意图

间的垂直尺度并不大。其上部边界层距离地面最高不过20—30米左右，下部边界层深入土壤中也只在30—50厘米以至几米上下。从农业气象学科考虑，栽培植物及其生产过程是一个作用系统，即土壤—植物—大气系统，或可称之为农业气象系统。这个系统各个参量及其相互关系，蒙蒂斯（J.L.Monteith）等人用图1.1表示，可供参考。

农业气象学的任务，实质上就是要了解这个系统内的机制、状态与过程的相互关系；从物质守恒与能量平衡定律来阐明农业生产对象从系统外部的输入项如何促使生物体生长发育和形成产量；从能量转换与物质输送的观点出发，按照需要，为采取措施以利用、调节和改造这个系统，提供依据；最后，为获得高产优质的农产品，提供最优气象条件与气象措施。

**四、居住环境、生存条件和影响因素**

生物体的居住环境是指它一生中所处周围环境条件的总和。居住环境相同，适宜种植的植物不一定相同；反之，同一种植物也可以在不同的居住环境中生长。例如水稻，从我国海南岛南部一直到黑龙江北部都可以种植，它们的居住环境很不相同。再如马铃薯原产于南美洲，引进我国后，从平原到高山，从寒冷到炎热，从湿润到干旱的地区都能种植。因此，用居住环境来讨论其对农业生产的影响是不确切的。

实际上，生物体一生中所需要的环境因子只是其居住环境中的一部分因子。生物体一生所必需的那些环境因子，称之为生物体生存条件。就气象因子来说，就是农业气象条件。

生物体所处的环境中，还有一些因子对生物体的生育起着危害作用，这类环境因子称为影响因素，它们是生物体生长发育的限制因子。农业气象灾害如干旱霜冻、冷害、干热风、大风等都是影响因素；其他如土壤中盐分过多，植物病虫害以及动物疫病等，能危害动植物，因而也是影响因素。

## §2　农业气象学的定义及其研究对象

### 一、农业气象学的定义

农业气象学是研究农业生产与气象条件的相互关系及其规律的科学。它是根据农业生产的需要，运用农学和气象科学技术来不断揭示和解决农业生产中的农业气象问题，以谋求合理利用气候资源，战胜不利气象因素，促使农业发展的实用性学科。

农业气象学的研究对象不能单指生物体及其生产过程，也不能单指生物体所处的气象环境，而是生物体与气象条件两者相互作用的规律及其影响。一方面研究农业生产对气象条件的要求和反应，气象条件对农业生产的影响；同时，另一方面也研究农业生产对气象条件的影响。

农业气象学是一门边缘而又独立的学科。气象工作为农业生产服务时，要在两者相互关系上进行，因而产生了农业气象学。它是应用气象学的一个分支，属于气象科学的范畴。农业气象学也可属于农学的范畴，正如农业土壤学属于农学的范畴一样，成为农业科学的基础学科。这种特点，使它能综合农学和气象学的成就，成为农业气象学发展的力量源泉。事实上，当代科学技术发展的主要特征之一正是学科不断分化成更加专门化的分支学科，各学科之间的互相渗透，不断发展，又形成新的边缘学科。农业气象学正是这样发展而形成的学科。

### 二、农业气象学的目的、主要内容及其基本任务

如前所述，农业气象是一门应用学科，因此从农业生产实际出发，围绕农业专业化、商品化和现代化，以及加强农业基本建设，改善农业生产条件，实现农、林、牧、副、渔全面发展和科学种田等需要，不断认识和解决它们中的气象问题，使农业生产能充分而合理地利用气候资源，战胜不利气象条件，逐步为农业发展提供科学的气象依据和措施，便是农业气象学的目的。

农业气象学的主要内容大体可归纳为以下几个方面：

（一）农业气象基本方法与理论的研究

作为农业气象工作的基础，农业气象监测及其仪器要朝向自动化、遥测化和综合记录化方向发展，并积极运用卫星图像提供的气象和有关农学信息，开展农业气象研究；研究利用卫星和航测等新技术对作物生长状况及气象灾害等进行监测。

农业气候资源分析、评定区域气候对农业生产的利弊，预测未来气象条件对农业生产的影响以及为改善农业小气候条件提出有效措施等都必须有相应的衡量气象条件对农业生产利弊的尺度，这些尺度称之为农业气象指标。它是在当地气象条件与农业生产水平下，生物体的生长发育、产量形成以及各项农事活动对气象条件要求与反应的参数值。研究与确定各类农业气象指标，是农业气象研究与服务的基础工作。

在对气象因子与作物生长发育和产量形成关系分析的基础上，开展农业气象模拟和模式的研究，使农业气象工作走向定量化、客观化，并从建立作物—天气的统计模式深化到从理论观点建立作物—天气模式与作物—土壤—天气模式。

（二）农业小气候研究

利用、调节和改造设施农业的小气候环境是十分重要的，也是可能的。即使将来人工控制天气和改造气候的能力提高，这项工作仍然十分必要。因为在大气候背景下，设施农业的小气候环境影响农业生产更为直接。我们要根据土壤—植物—大气系统中农业生物生长发育规律和农业产量形成的研究成果，能动地为设施农业中农业生产对象和生产过程创造出最优的农业小气候环境。这是农业气象科学发展的重要方向。

（三）农业气象灾害规律及防御措施的研究

由于我国天气、气候特点，各种农业气象灾害频繁，往往导致农业减产甚至失收，因此战胜灾害是保证农业稳产的重要措施。从观测受害症状、受害时期、研究受害机制，确定受害气象指标，分析灾害发生的天气、气候规律，发布灾害预报以及提出有效防御措

施等这项系列工作，是研究并战胜农业气象灾害的具体任务。

我国干旱、半干旱地区约占国土面积二分之一，农业干旱是这个地区农业发展的主要障碍，也是这里生产水平低下，生态平衡失调的主要原因之一。但这个地区光、热资源丰富，高山水量也较多，是我国今后经济发展的重点开发区之一。因此研究该地区农业干旱规律、探求防旱、抗旱对策，对制定该区大农业发展的战略决策、改善生态环境，具有重大的理论与实践意义。在我国湿润、半湿润的易旱地区，干旱危害有时也很严重，同样需要研究并力求对策的。

（四）农业气候资源分析及其开发利用研究

这是一项具有战略性意义的任务，能为农、林、牧、副、渔的全面发展，最合理地改革种植制度，规划农业布局，开垦荒地，引进优良品种以及重大农业技术改革等提供决策服务与气候保障。

我国山区占国土面积的68%，遍及全国各地区，正是发展农、林、牧、副立体农业的良好基地。开展农业地形气候工作，特别是热带、亚热带地区的这方面工作，显得更为迫切。这是当前我国农业气候工作的一项重要任务。

（五）农业气象情报、预报方法研究与服务

开展农业气象服务系统的研究，逐步建立农业气象情报、预报服务自动化体系。从农业生产全过程出发，抓住关键时期进行农业气象情报预报服务，以便及时采取措施，是一项具有战术性意义的任务。

（六）因地制宜开展专业气象研究和服务

根据保护生态平衡，全面发展农、林、牧、副、渔以及逐步改变我国人民食物结构的需要，因地制宜地开展畜牧、渔业、林业、园艺、病虫以及养蜂、蚕桑、各地“名特优”产品等专业气象研究与服务。

今后一段时间内，我国农业气象工作的发展方向和基本任务是：紧密围绕农业专业化、商品化和现代化的需要，积极发展农

业气象信息产品，大力加强农业气象应用和开发研究，加速建设具有我国特色的农业气象业务、服务体系，逐步实现农业气象科学技术现代化。

农业气象实践的深入，必然要求采用新的实验手段解决农业气象中一些基本理论问题，因此，必须进一步开展农业气象基本理论的研究和不断引进新技术、新方法在农业气象中的应用。

## §3 农业气象学的诞生与发展

### 一、我国农业气象工作的建立与发展

（一）我国古代丰富的农业气象经验与知识

几千年来，我国人民在农业生产实践中，发现了农业生产与天时的密切关系，积累了丰富的农业气象经验，在历代农业知识宝库中，农业气象知识极为丰富。如诗经、吕氏春秋、管子、汜胜之书、淮南子、齐民要术等书不仅是农业生产的经验总结，也包含有丰富的农业气象知识。大量的经验还以谚语、诗歌等形式在人民群众中广为流传，至今仍对农业生产起着重要作用。

战国时代《荀子》就谈到："春耕、夏耘、秋收、冬藏，四者不失时，故五谷不绝，而百姓有余食也"。秦朝《吕氏春秋》有："夫稼，为之者人也，生之者地也，养之者天也"。西汉《汜胜之书》有："凡耕之本，在于趣时，和土，务粪泽，早锄早获"。北魏《齐民要求》有"顺天时，量地利，则用力少而成功多，任情返道，劳而无获"。这些古书中的天、时、天时等都是指的农业气象条件。

历代劳动人民不仅认识到"天"、"时"对农业生产的重要作用，而且还找到了"不违农时"的许多客观标准。用自然物候确定农时是古代最常用的，有些至今还在沿用。例如，用物候确定农作物播种期方面，《齐民要术》种谷篇中有"二月上旬及麻菩杨生者为上时，三月上旬及清明节桃始花为中时，四月上旬及枣叶丛生，桑花落为下时"。《月令辑要》中有"伎儿鸟春来则种禾，

秋去则种麦”等记载。用物候确定农业措施也有阐述。如《氾胜之书》中“杏始华荣，辄耕轻土弱土，望杏花落，复耕，耕辄蔺之”。《齐民要术》中有“二月冻解地开，烧而干之”等记载。这种利用物候现象来指导农业生产的方法为现代物候学奠定了基础。

二十四节气是我国古代农业气象学中一项伟大成就。它是农业对象、农业措施和天时的结合，长期以来，在我国起着农事历的作用，至今还为广大农民所习用。二十四节气源于黄河中下游，反映了这个地区的气候与农业生产特点。在它逐渐向黄河流域以外的地域推广过程中，结合了各地气候与农作物的生育情况并不断总结经验，加以修改，创造了适应当地生产的农谚。只要比较各地有关冬小麦播种期的农谚，就可知劳动人民是如何灵活运用二十四节气的。华北北部为“白露早，寒露迟，只有秋分正当时”，华北南部为“秋分早，霜降迟，只有寒露正当时”，至华中、华东一带推迟到“寒露、霜降正当时”，更南至浙江则迟至“立冬种麦正当时”了。据研究，冬小麦播种适期一般是日平均气温稳定通过16—18℃的时期，上述地区相应的几个节气前后，历年平均气温大致都在16—18℃之间，证明这些地区农民非常科学地运用了二十四节气。在较小的地区，二十四节气也得到了灵活地运用。如浙江宁波一带的经验是“立冬种麦正当时”，而温州地区则为“小麦冬至前”。山西临汾则更有“处暑种高山，白露种平川，秋分种门边，寒露种河滩”的农业地形气候的经验。

在战胜农业气象灾害方面，《氾胜之书》有“冬雨雪止，辄以蔺之，掩地雪，勿使从风飞去，后雪复蔺之；则立春保泽，冻虫死，来年宜稼”，这种增墒、防旱、防病虫灾害的措施至今仍然采用。《齐民要术》中提到：“凡五果花盛时，遭霜则无子，常预于园中，往往贮恶草生粪。天雨新晴，北风寒切，是夜必霜；此时放火作煴，少得烟气，则免于霜矣”。这里对霜的危害、预防以及预报等，都是符合现代农业气象科学的。《氾胜之书》种谷篇提到：“始种稻欲温，温者缺其塍，令水道相直；夏至后天

热，令水道错”。两千多年前，劳动人民就知道根据气候变化和水的特性来调节稻田的温度条件。

我国古代农业气象经验虽尚未形成一门完整的学科，但长期以来能有效地服务于农业生产，因此，调查总结农民的农业气象经验，并使之上升为理论，则不仅能为当前生产服务，还将大大地丰富我国的农业气象科学，走出自己的道路。

（二）新中国农业气象工作的建立与发展

尽管我国古代农业气象经验十分丰富，与同时代其他国家相比，甚至是领先的，但还没能从感性认识提高到理性阶段。解放前的几十年，虽然有了现代农学与气象科学，也有一些农业气象论著，但作为一项有组织的科学工作，还是在新中国成立以后。

新中国农业气象工作的发展过程，大致可分为四个时期：

1． 初创探索时期

1953—1958年我国实行第一个五年经济建设计划，农业生产对气象工作提出了许多要求，因此，开始筹建我国农业气象科研和业务机构，建立起一批试验研究机构和观测网，并在高校和中等专业学校创办农业气象专业。由于缺乏经验，照搬了苏联的经验，工作带有一定的盲目性。这个时期是探索发展我国农业气象工作的道路与方法的时期。

2． 发展一调整一稳步发展时期

1958年第一次南京全国农业气象会议总结了前一时期的经验教训，提出大力开展农业气象服务、大抓农业气象指标研究、总结出结合天气预报、历史气候资料、群众经验和实况观测的农业气象预报方法，大大地推动了当时各级气象台站的农业气象业务与服务。1964年在苏州召开的中国气象学会农业气象学术会议和全国农业气候区划会议，交流了各地服务工作经验与试验研究成果，制定了农业气候区划工作的规划。在不到两年的时间，已有十几个省级和少数县级初步完成其农业气候区划。这一时期，我国农业气象在科研、服务、业务和人员培养等方面都有较大的发展。

3． 停滞时期

1966—1976年，农业气象工作受到严重干扰，十几年建立起来的农业气象的基础几乎被破坏殆尽。尽管如此，不少基层单位仍然排除干扰，根据当地农业生产的需要，积极开展服务，科研、教学单位也都各自根据条件做些力所能及的工作。

4． 重建发展时期

1976年特别是1978年后，农业气象工作经过恢复、整顿，已得到扎实、稳步地发展。重新组建了农业气象基本观测网，增加了大农业的观测内容，改进了观测方法。开展了各种形式的农业气象服务，不断改善与充实服务手段与内容，并逐步向自动化与定量化方向发展。完成了全国的、省的和大部分县的农业气候资源调查与区划。农业气象试验研究发展迅速，研究领域不断拓宽与深化，新的手段与技术陆续引入，并已取得可喜成果。1985年在北京召开的第二次全国农业气象工作会议上明确了业务指导思想和农业气象工作发展方向与基本任务，并要求创立具有中国特色的农业气象技术方法和农业气象理论。

**二、国外农业气象学的主要进展**

根据世界气象组织（WMO）农业气象委员会（CAgM）近几次届会的决议以及苏、美等国情况，世界农业气象总的发展趋势主要是：国际性的协作与综合研究日益发展；农业气象研究领域日益扩大，在生产对象上不仅从单纯的研究作物气象发展到大农业、大粮食气象的研究，还从个体到群体进行不同尺度的农业气象研究。农业小气候研究对象拓宽，内容日益深入，从机制、过程、状态和能量转换、物质输送的观点研究农业气象系统的调整与改善；新技术、新方法开始在农业气象研究中广泛应用；农业气象观测、资料处理加工、传输、情报预报服务自动化系统正逐步建立；日益重视农业气象的经济效益、社会效益和生态效益等等；现从几个方面分别做些介绍。

（一）农业气象预报

近年来，农业气象预报和农作物产量预报服务已普遍开展，并进行了农业气象服务及效益评价的研究。预报种类大体上可分为农用天气预报、作物生育期（主要是适宜播种期和收获期）和作物产量与质量预报。农用天气预报包括霜冻、干旱和冷害等灾害预报以及生长期积温和降水概率等预报。预报对象包括种植业、畜牧业、农事活动、森林火险以及病虫害发生发展等。

近一、二十年来，农业气象产量预报取得了迅速的进展。利用气象因子与产量之间的关系建立了产量预报模式。近年来，与统计模式发展的同时，都积极地开展了天气—作物产量的动态模拟的研究，即逐步深化到气象条件与产量形成有关的各生理过程（如光合、呼吸、物质输送等）的模拟。苏联、加拿大等国家已进展到精确模拟各种气象条件对作物影响的试验和作物群体理论模拟的研究，以能量平衡为基础，引进大量参数，研究建立天气—土壤—作物产量模式。最近，苏联提出物理—数学动态模拟制作产量预报。

（二）农业气候

CAgM长期以来一直把农业气候提到战略地位来考虑它对农业生产的影响。

世界各国认识和分析农业气候资源的方法不尽相同。波兰1977年以表达热量特征的四个指标综合作了全国农业气候区划，并分成四级，按作物制图。苏联70年代完成了农业气候区划，1985年出版有Д.И.莎什科的《农业气候资源》一书。日本也很重视农业气候资源的研究，提出了不同的农业气候资源评价方案。例如，内岛善兵卫等人从能量平衡的观点对日本进行了农业气候区划。A.J.帕斯卡里用年的光周期变化、最冷月份和温暖期平均温度以及小麦播种期的水分平衡指标，研究了世界小麦的生态气候型，还按温、湿、光等条件对大豆作了类似的划分。

分析农业气候资源，必须回答种植某种作物的合理性。苏联A.P.康士坦丁诺夫等人近十年来综合考虑作物的生物学特性、

天气条件、土壤肥力和农业技术水平进行土壤—气候区划的研究，提出土壤—气候资源鉴定综合植物物理模式，对冬麦、春麦、黑麦、玉米等主要作物进行了土壤—气候资源的分析与区划。农业生产对象气候生产力的研究受到重视。

各种尺度的农业气候和农业地形气候已为人们所重视，并已发展为农业气候学的一门很有生命力的新的分支。

（三）农业气象灾害和农业小气候

农业气象灾害的研究得到各国的普遍重视，有些国家已把它列为农业气象研究和服务的重点。

冷害已是全世界带有普遍性的农业气象灾害。受害的作物不仅有水稻，还有玉米、高粱、豆类、麦类和果树、蔬菜等，发生的地区，遍及各个气候带。日本对冷害规律、机制进行了较深入的研究，并提出了很多措施，其中大都涉及到农业气象研究。如从农业气候分析上提出安全齐穗期；从预报上选择品种类型、提出适宜播栽期；从农业小气候研究上，提出有效水层管理措施以提高水温，用鼓风机以搅乱近地气层气流，种植防护林和防风网以改善农田小气候等。霜冻的防御，近年来已趋向机械化、自动化。日本、苏联研究了烟雾防霜的物理基础。日本试制了烟雾发射机，苏联制做了高效烟砖，美国和西欧采用鼓风机等。但是改善农业小气候环境以战胜冷害和霜冻仍是主要措施。除营造防护林、搞好农田基本建设、调节农田群体结构等外，其他可概括为实行保护地栽培和采用物理化学方法以及生物防除法。干旱和农业干旱指标国内外不下几十种，大致可归纳为：（1）单纯用降水量作指标；（2）水量平衡指标；（3）用土壤水分与作物参数表示等三类。控制局地环境可以减轻干旱，如覆盖、风障、改变达到农田上太阳辐射量、植树种草、抑制蒸发、人工局部降水等都是控制干旱的有效方法。农业环境污染的有关气象问题已开始研究。

近年国外对农业小气候（或农业微气象）的研究相当活跃，并有不少农业小气候的专著出版，如70年代美国的《森林小气候》、

《小气候—生物环境》和英国的《植被与大气原理》。80年代苏联的《农业小气候指南》《农田小气候管理》，日本的《植物动态环境》《农业环境调节工程学》《设施园艺环境调节新技术》等书，都是近年来农业小气候研究的总结。

（四）农业气象探测仪器与实验研究手段

农业气象仪器的主要趋势是向遥测化、自动化、综合化方向发展。

人工气候室和人工气候箱已在农业气象研究中广泛应用。电子计算机在农业气象服务和研究中广泛应用。随着农业气象学与植物生理学、植物生态学、数学的密切结合，农业有机体的生长发育和产量形成，最终能够用模拟模式求解，并建立从探测到情报预报的自动化服务系统。

国外已应用卫星资料研究气象条件的地区差异及其动态变化和对植被、种植业的影响，以及制作产量预报、病虫害预报，编制农业区划等。航空遥测普遍开展，80年代澳大利亚利用航测方法测定与农业有关的边界层参数。1987年苏联出版了《植被遥测中的理论和试验》一书。

新技术、新方法已在农业气象服务与研究中应用。新技术如信息技术、空间科学技术、生物技术、新能源技术以及海洋开发等，新方法如系统论、控制论、耗散结构论、协同论、突变论等都已开始在农业气象研究中应用，并已窥见其良好前景。

## 参 考 文 献

〔1〕J.Seemann等，农业气象学（亓来福等译），气象出版社，（1984）。
〔2〕北京农业大学农业气象专业编，农业气象学，科学出版社，（1981）。
〔3〕中国科学院农业现代化研究委员会编，农业发展战略学术论文集，科学出版社，（1982年）。
〔4〕关于发挥地区优势的研究，农业出版社，（1983）。
〔5〕洪世年、陈文言，中国气象史，农业出版社，（1983）。
〔6〕冯秀藻、欧阳海，二十四节气，农业出版社，（1984）。

〔7〕气象科技编辑部编，气象科技，有关国内外农业气象科学综述的文章，1980—1989年各期。
〔8〕国外农业气象编辑部编，国外农学—农业气象，有关国外农业气象科学综述的文章，1982—1989年各期。
〔9〕中国农业气象编辑部编，中国农业气象，有关国内农业气象科学综述的文章，1979—1989年各期。
〔10〕南京气象学院学报编辑部编，气象教育与科技，有关国内外农业气象科学综述的文章，1978—1989年各期。

# 第二章　太阳辐射与农业生产

## §1　光的生物学意义与植物的光学特性

### 一、光是生物体生命活动的能量源泉

太阳辐射是地球上生物有机体的主要能量源泉。地球上所有生命都靠来自太阳辐射提供生命活动的能量。首先，由绿色植物吸收太阳光能合成有机物质，把太阳能转化为贮藏于生物有机体中的化学能，供给生物圈中动植物和微生物以及人类的需要。植物的光合作用几乎使所有的有机体与太阳辐射之间发生了最本质的联系。同时，地球表面也吸收一部分太阳辐射直接转变为热能，其中一部分用于水分蒸发，其余部分用于增加地表的温度，因而太阳辐射也是构成地表热量和水分等分布状况的能量源泉，它为维持生命的外界环境创造了必要的条件。

到达地球上的太阳辐射就其最主要的作用而言是产生光合效应、热效应和光的形态效应。西曼（J.Seemann）等认为地球生物圈内的光辐射的生物学效应可分为：1.有机物质的组成，其中包括光合作用，维生素D和花青甙的形成；2.物质输送，其中包括染色、红斑病的形成和杀菌作用；3.刺激作用，其中包括光周期现象、向光性、趋光性、感光性、光发芽和暗发芽、光形态形成以及叶脉与分泌腺的刺激作用。光和热是动、植物生长发育和产量形成的根本条件。光对叶绿素起着它的化学作用，没有光，不能产生叶绿素，也不能进行二氧化碳的合成。光是植物光合作用的能量源泉。光对植物的热效应，由于植物的蒸腾，不致使植物体温过高而“灼”死。光还影响植物营养体形态的建成和生长发育以及叶的方位等。光在相当程度上影响植物的地理分布，如

人们熟知的阳性植物与阴性植物的分布等。当然动物的生长、繁殖也是不能没有光的。各种辐射光谱区对植物生命活动的重要性概括为表2.1。

**表2.1　辐射波段及其对植物生命的重要性**

| 辐射波段 | 光谱区 (nm) | 占太阳辐射能的(%) | 对植物生命的效应 | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | 热力的 | 光合作用的 | 光形态发生的 |
| 紫外线 | 290—380 | 0—4 | 不重要 | 不重要 | 中等 |
| 光合有效辐射(PAR) | 380—710 | 21—46 | 重要 | 重要 | 重要 |
| 近红外辐射(NIR) | 710—4000 | 50—79 | 重要 | 不重要 | 不重要 |
| 长波辐射 | 3000—10000 | | 重要 | 不重要 | 不重要 |

(J.Ross, 1975)

光对生物有机体的影响是由光照强度、光照长度、光谱成分的对比关系构成的。它们各有其时、空变化现律，在地球表面上的分布也是不均匀的。光的这些特点及其变化，都对有机体生长发育和产量形成产生影响，如光照强弱和光谱成分不同，会影响植物的光合强度、刺激和支配组织的分化以及形态建成等，在某种程度上，决定着植物器官的外部形态和内部结构。日照时间的长短则制约很多植物的开花、休眠、地下贮藏器官的形成过程。而光谱成分也不是所有波段都对光合合成起有利作用，有些波段甚至对植物有害。所以光对植物具有重要的生理、生态作用，是一切绿色植物生长发育过程中的一个极为重要的因子。光合产物的多少是植物产量最根本的生理基础，也是间接地影响第二性生产所需要的能量与物质。但植物光合作用利用太阳能的程度很低，一般认为绿色植物只能吸收落到叶子上太阳能的50%左右，其中又只有1—5%参与植物的光合过程。而植物通过光合合成的物质却占植物总干重的90—95%。当前人们虽不能改变太阳能的大小及其在地球上的分布，但能提高到达地面上太阳能的利用率，特别是提高植物接受光能的面积和它们的利用率，却是完全可能的。农业气象学任务之一，就是研究太阳辐射能与农业生产的相

互关系，以便采取措施，达到充分提高太阳能利用率，获得农业的高产优质。

## 二、植物单叶的光学特性

### （一）叶片对光的反射、透射和吸收

投射于叶面的太阳辐射，可分为反射、吸收和透射三部分。反射由外反射和内反射两部分构成。外反射是叶片表皮层与空气的界面所发生的反射现象。内反射是投射到叶子内部，又从投射一侧返回空气中的辐射。进入叶内的阳光，在叶内反复迂迴，若通过叶绿体部位，则由于其中所含的叶绿素，一部分光能便被吸收。叶片组织所不能吸收的剩余部分辐射能，从光能投射一侧至其对面一侧往叶外逸出，称为透射光。反射率R、透射率T和吸收率A有如下关系：

$$R+T+A=1 \tag{2.1}$$

其中R、T、A的比例分配，既因生物种类，也因叶龄、光的投射角度、天气状况以及叶片内各种色素的含量而异。

1．叶片的反射能力

植物叶子对太阳辐射的反射能力大小，主要决定于叶子本身的特点（即它的表面状态、形态、色彩、水分含量及保护覆盖物等）和太阳光谱的成分。一般，叶片对各波段光谱的反射规律是：（1）可见光域的反射大致决定于以叶绿素为主的色素种类和数量，反射率在绿色部位呈现高峰，而蓝色及红色部位最低，自670—680nm随着波长的增加而急剧升高。（2）750—1100nm的近红外波域的光谱反射，大致决定于叶片内部的细胞构造。（3）1300—2800nm波域的光谱反射大致决定于叶中的含水量。

2．叶子的透射能力

植物叶子对太阳辐射具有透射能力，直观也能感觉到。根据实测，通常植物叶子的光谱反射能力与透射能力相当，即凡是植物反射较强的光谱段，植物对其透射能力也较强。图2.1是两种植物叶子对光谱的透射能力，在可见光部分，植物叶子的透光率

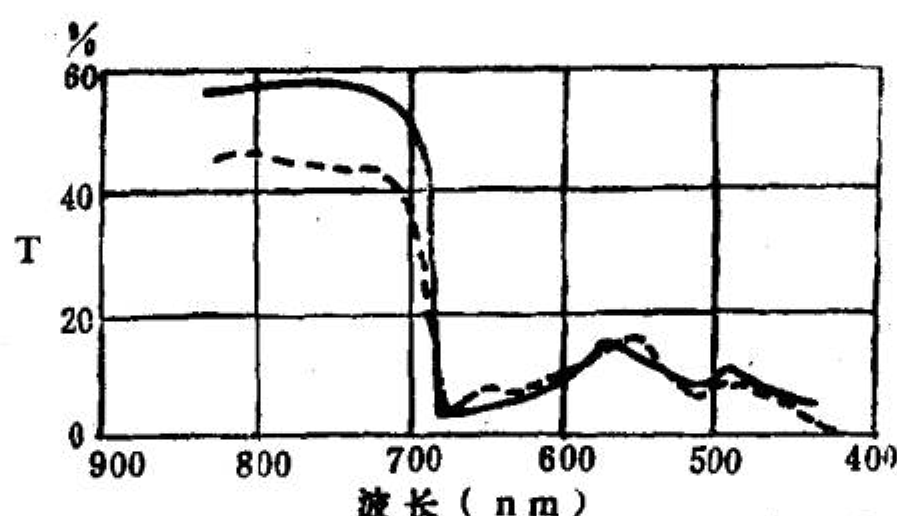



图2.1 两种叶子的光谱透射率
〔实线为红山毛榉嫩叶，点线为樱草属叶
图中T为透射率（%）〕

在5—20%之间，相对高值在550—580nm波段，即黄绿光部分出现。透射率最大的光谱在近红外区（约800nm）。

3． 叶子的吸收能力

植物叶子在反射、透射太阳辐射的同时，还吸收其中一部分。它对不同波长的太阳辐射也具有很强的选择吸收能力。蒙蒂斯（Monteith，1973）曾绘制绿色叶子的光谱反射率、透射率和吸收率之间的关系（图2.2）。表2.2列出三个波段的平均反射率、透射率和吸收率。它们一致地反映出，绿叶有两个明显的吸收峰，在光合有效辐射部分和长波辐射部分，以后者为最强。叶肉组织吸收的大部分光线，依赖于色素类，主要是叶绿素（a、

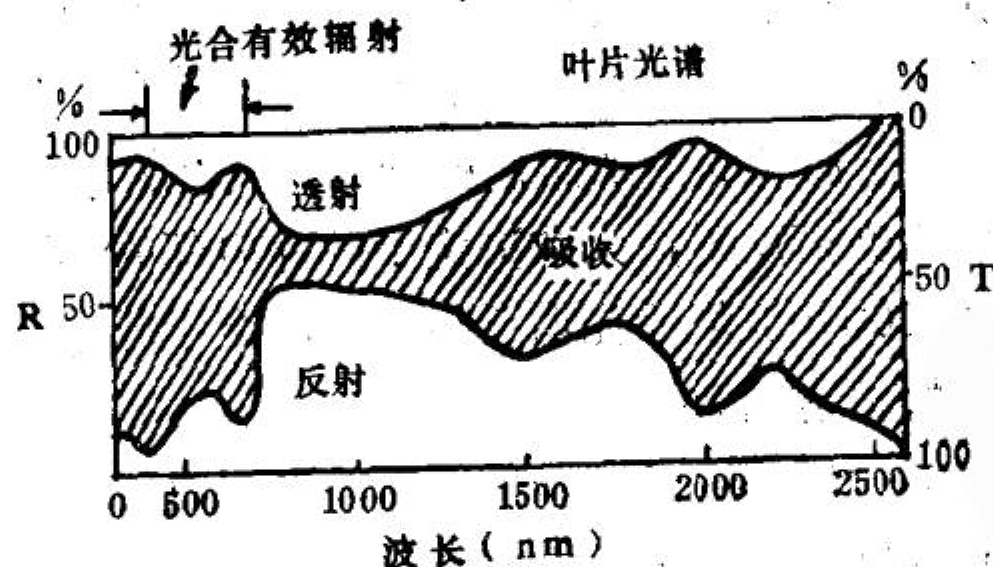



图2.2 绿色叶片的透射(T)、反射和吸收(R)的理想光谱
(Monteith, 1973)

表2.2　绿叶对不同波段的平均反射率、透射率、吸收率

| 波段 | 光合有效辐射 (380—710nm) | 近红外辐射 (710—4000nm) | 短波辐射 (350—3000nm) | 长波辐射 (3000—10000nm) |
|---|---|---|---|---|
| 反射率 | 0.09 | 0.51 | 0.30 | 0.05 |
| 透射率 | 0.06 | 0.34 | 0.20 | 0.00 |
| 吸收率 | 0.85 | 0.15 | 0.50 | 0.95 |

(J.Ross, 1975)

b）和类胡萝卜素。叶子对光的吸收表现为强烈的选择性，红色部位吸收峰主要是叶绿素的作用；蓝色部位的吸收峰，则是基于叶绿素和类胡萝卜素两者的综合作用。红外部分的反射、吸收和透射状况，因波长而不同。在波长较短的范围，670至1100—1300nm，反射和透射的比例急剧增高，吸收率急剧下降，占0—15%，叶片只是吸收其中极少量的几乎是透明的成分。

（二）叶片反射特性的应用

植物对一定波长区域的辐射具有一定的反射率，各种农作物、林木、病虫害、生物量等都能反映一定波长域的变化。植物最重要的反射率是含叶绿素叶片的反射率。植物的覆盖率、地面、太阳高度等也对反射率有一定影响。

植物从开始生长到成熟，总叶面积和叶绿素含量都发生变化，从而引起各波段反射率的变化。当植物受到灾害时，叶绿素分解、叶片含水量、体温发生变化等也会引起反射率的变化。现代遥感技术利用了植被层各波段的反射特性，使得农作物长势的评价、产量的预测预报、农作物分类资源调查等方面得到了广泛的发展。

据测定，初生叶绿素时期的嫩叶，在红光波长域看不到叶绿素的吸收，随着生长，在红光波长域就出现叶绿素的吸收。成熟的叶片在680nm附近具有最大的叶绿素的吸收，约在555nm处显示可见光波长域最高的光谱反射率。跟着叶片的成熟，叶的颜

色变成暗绿色，这时在绿色光波长域的光谱反射率下降，而在近红外波长域光谱反射率却增加。在色素影响的同时，光谱反射率随着叶片本身构造的变化而变化。在一般情况下，近红外波长域的反射率随叶片内部的细胞形状、大小、细胞间隔、细胞与空气临界面状况的不同而变化，即由于嫩叶随海绵组织间隔大小，内部反射的不同，其光谱反射率变大。但随叶片的生长，叶片内部细胞间隙被填满，反射率下降。

随着覆盖率的变化，植物冠层构造的不同以及植物茎顶部的大小不同等，在680nm附近，叶绿素的光谱吸收和光谱反射也产生变化。植物覆盖率随植物种类而不同。这种波长域对植物的分类是非常有用的。

550nm附近的绿色波长域的反射与绿色覆盖率有关，与近红外有类似的倾向。根据植物生理状况的不同，可分为绿色波长域的反射率上升、下降和不上升也不下降三类。反射率上升是由于叶绿素的色素减少，红和蓝色波长域的光谱反射也同时上升；下降则反之。另外，含水量的减少，在中红外波域（2000—2400nm附近）。叶片光谱反射上升倾向并不显著。由于生长季节变化，病虫害等原因，叶片叶绿素含量减少，而叶红素、花青素等将相对占优势，这时叶色发生变化，可以用来对植物进行监测。

800nm左右的近红外波长域的光谱反射，一般随着叶细胞与空气临界面的几何变化而变化。当成熟的叶从受生理刺激时，反射率上升。近红外波长域的反射率与绿色覆盖率的变化有关，特别是因为叶片对近红外光透射率高，所以适用于叶片密度的调查。在中红外波域（1600—2200nm附近），叶的光谱反射率与叶片含水量有关。象在近红外波域那样，细胞与空气临界面不容易受影响，并且叶的光谱反射率与透射率表示出正相关关系。因此，使用中红外波长域能够知道叶的表面光谱反射的微小变化。

土壤—水—植物系统的管理和生产效率与太阳能有密切关系。对于能量收支的研究，热红外（1000nm附近）的辐射很有

用。热红外也可用来调查土壤温度，而土壤温度是与土壤中的水分蒸发、风化、化学分解速度、微生物的活动、有机物的腐烂、植物的发芽及生长速度等有直接关系。热红外波长域比可见光波域和近红外波长域更有利于进行农作物的分类。

## 三、群体叶片的光学特性

太阳光能进入农田植被中，受到植被中茎叶的层层削弱，有的被反射、有的被吸收，有的透过第一层叶片，进入第二层后又被吸收或反射或透射等等，当然也可能有通过茎叶之间空隙而到达地面的。总之，这里发生着对太阳光能的多次反射、吸收和透射过程。这个过程的强弱与植被本身的特征（作物种类、生长发育状况）有关，而这个过程又反过来影响植被本身的生长发育。植被的密度、品种、叶子的性质（含水量、厚薄、颜色、大小等）的差异，使得各种植物的反射、吸收、透射的能力不同。即使是同一种作物，对于不同波长的辐射，其反射、吸收、透射能力也不一样。太阳辐射进入植被内部，经过层层反射、吸收、透射形成一个较复杂的过程。表2.3表示小麦麦穗的含水率y（%）与光谱反射率x（%）的定量关系。

表2.3 含水率（%）与反射率（%）之间的关系

| | | |
|---|---|---|
| 450nm(蓝) | $y=43.8x-21.8$ | $r=0.577$ |
| 550nm(绿) | $y=29.2x+13.1$ | $r=0.364$ |
| 650nm(红) | $y=27.2x+17.6$ | $r=0.754$ |
| 850nm(红外) | $y=42.6x+20.4$ | $r=0.263$ |

光在群体内的分布曲线，因作物而有不同。对于油菜地和小麦地来说，相对总辐射随植株相对高度而不断地下降，并在植株相对高度20—70%之间下降最为迅速。另外，油菜地的相对总辐射在同一相对高度下总比小麦地为小，这是由于油菜的叶面遮蔽要比小麦大的缘故，见图2.3。

研究中常用透光率来表征农田中的透光情况。所谓透光率，

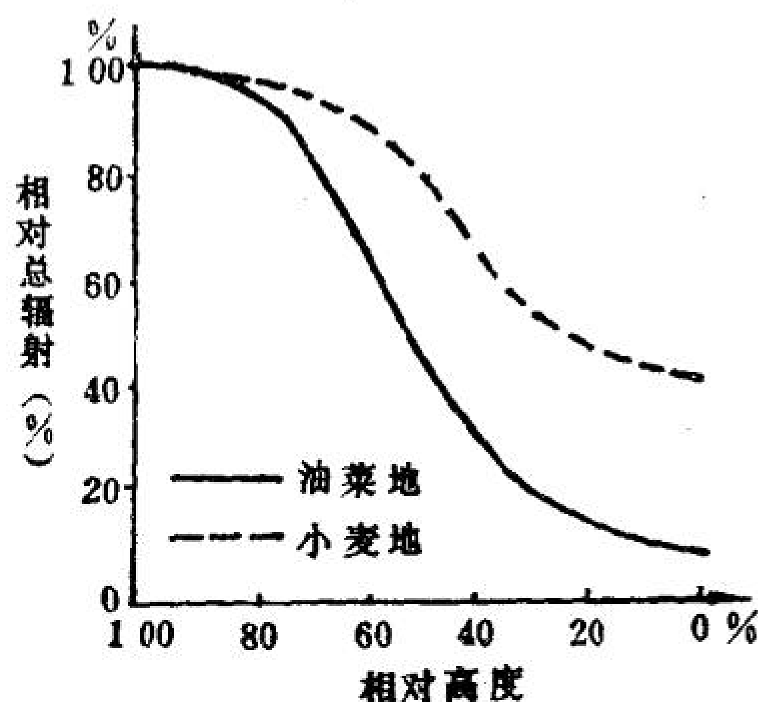



图2.3 相对总辐射在植被中分布
（油菜株高 158厘米，小麦株高 123厘米）（翁笃鸣等，1981年）

就是农田中各高度的照度与农田上方（对照点）照度的比值，常用小数或百分数表示，也称相对照度。农田中透光率的分布曲线是与光照分布曲线完全一致的，具有相互可比性。

农田中，由于太阳视位置的周日变化，总光强也有着日变化。平均说，具有露地相同的日变化形式，只是因向植被内部深入，太阳光能显著减弱（图2.4）。农田中各高度透光率也有明显的

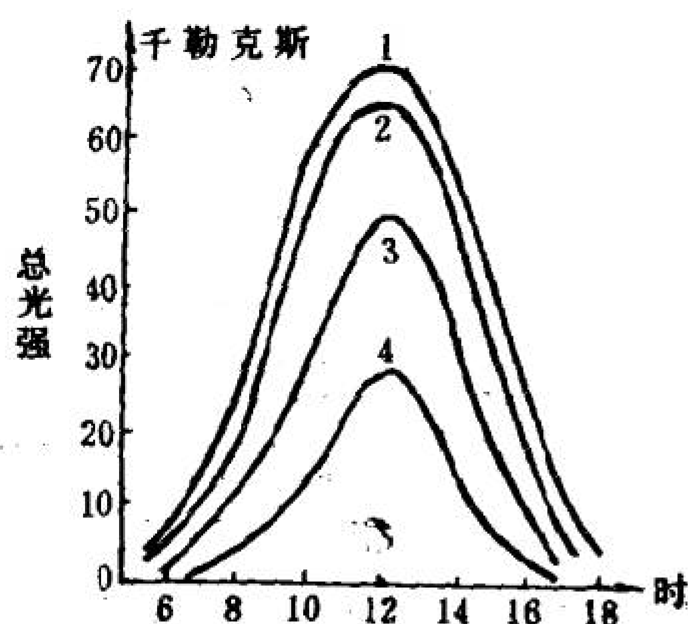



图2.4 晴天小麦地中各高度总光强平均日变化
（株高95厘米；1.80厘米；2.60厘米；3.40厘米；4.20厘米）
（翁笃鸣等，1981年）

变化，这是由于太阳高度角的改变，引起太阳光线在植被中通过的角度与距离改变所造成的。因此中午时透光率最大，早晚较小。

### 四、绿色叶子的能量平衡

植物叶子吸收太阳能总量很大，但叶温没有强烈升高，因此，探究叶子中的能量分配，对于提高光能利用率是很有意义的。

太阳光能中的可见光、红外线和紫外线到达地面上的比例虽因季节、纬度、地势和气象条件等而有不同，但大体上可见光约占45—55%，红外线50—60%，粗略计算各占一半，紫外线仅占0—5%。据观测，在夏季晴天正午，当太阳高度为60°时，太阳光线到达大田中的总强度约为5.02—5.44焦耳·厘米$^{-2}$·分$^{-1}$。光能达到叶面上后，有85%的可见光和25%的红外线为植物叶子所吸收。如果这些叶子在密闭而透明的小室中，不进行蒸腾和光合作用，不向周围散热，很显然，叶子吸收的能量都将用来增高叶温。通常1厘米$^2$面积的叶片约重0.02克，新鲜叶子的热容量为3.6焦耳·克$^{-1}$。这样在太阳照射下，一分钟内叶温将升达38.4℃，显然，叶子将由于高温而"灼"死。实际上叶温增高并不多，原因就在于叶子所吸收的能量极大部分用于其他过程，组成叶子的能量平衡。

（1）能量用于光合作用。实验证明，在适宜的条件下，用于叶子进行光合作用的能量约为2—5%。一般情况约为1—2%左右，甚至少于1%。光合产物的含热量(以碳水化合物计)平均约0.278焦耳·厘米$^{-2}$·分$^{-1}$。因此，叶子利用它所吸收的能量的1—2%，就能在每平方米上每小时形成约1—2克的光合产物。

（2）能量用于叶子向周围环境散热。许多人的工作认为，当叶温升高时，叶温与周围环境温度相差1℃时，就会向外放散0.1668焦耳·厘米$^{-2}$·分$^{-1}$的热能。在太阳辐射条件下，植物叶温

比周围气温平均约高1—3℃。因此，在直接把热量传给周围空气时，植物要消耗所吸收光能的3.8—6.4%，平均5%。

（3）余下的能量转化为热能，可使623—640克的水分蒸腾，并在光合作用中形成约1克干物质。

这就是植物叶子在吸收太阳光后能量平衡的粗略计算。图2.5中A是落在叶子上能量的分配，B是叶子所吸收的能量的再分配。当然，由于植物生长与太阳高度处于动态状况和呼吸要消耗能量

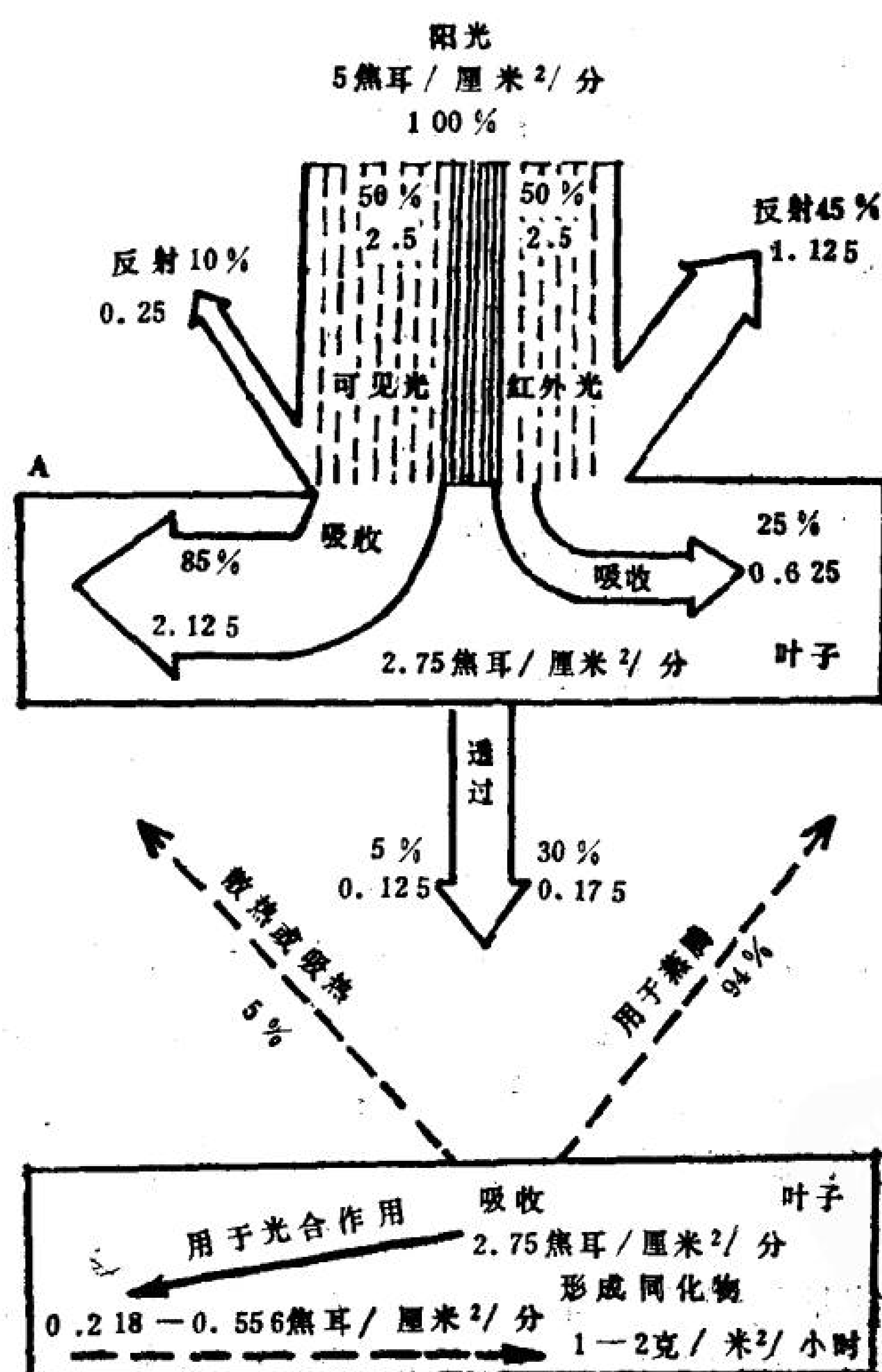



图2.5 阳光落在叶子上后能量平衡示意图

等原因，这个能量分配示意图是十分粗略的，在条件变化时，在这种或那种具体条件下，不同的植物和不同的群体都会有不同的适应性来最好地进行能量平衡的。

**五、光合作用的能量转换效率**

每一个光量子以具有一定的能量为其重要特征，它的能量大小决定于

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \tag{2.2}$$

式中，E为每个量子具有的能量（焦耳）；h为普朗克常数，等于$6.626 \times 10^{-34}$焦耳·秒；$\nu$ 为振动频率，等于$c/\lambda$，c为光速，等于$2.988 \times 10^{40}$厘米·秒$^{-1}$，$\lambda$为光谱波长。因此，一克分子的物质进行光化学转变所需的能量为：

$$E = Nh\nu = \frac{Nhc}{\lambda} \tag{2.3}$$

式中，N为阿伏加德罗常数，它等于$6.023 \times 10^{23}$·克分子$^{-1}$。这样，一个克分子数的量子所含的能量（爱因斯坦值）决定于波长，即

$$E = 1.192 \times 10^{8}/\lambda \text{焦耳/克分子}$$

当波长为400nm时，E＝298100焦耳；当波长为760nm时，则E＝156903焦耳。

量子效率是指光合作用本身能量转换效率，通过许多人的试验，认为释放一克分子的$O_2$需要 8 —10个量子，即光合作用量子数是 8 —10个爱因斯坦值。

一个爱因斯坦的能量等于 156903—298100 焦耳（波长760—400nm）。400—760nm之间，其能量相当于575nm 的单色光，它等于2073848焦耳。光合产物以碳水化合物计，每克碳水化合物所含的能量，因不同作物而异，一般可采用177929.00焦耳，所以一个克分子碳水化合物（$CH_2O$）所含的能量等于 177929.00 ×30焦耳。因此，

$$量子效率=\frac{177929.00\times30}{2073848\times8}\sim\frac{177929.00\times30}{2073848\times10}$$
$$=32.2\%\sim25.7\%$$

即光合作用的能量转换效率等于25.7%—32.2%，也就是太阳能利用率的最大值。或者说在极端理想的情况下，光合有效辐射完全用于转换为化学潜能的上限值。

## §2 光合有效辐射

### 一、光合有效辐射的概念

植物的光合作用光谱比短波辐射的整个波长区（300—3000nm）狭窄得多。植物能在没有紫外线和红外线的辐射谱段中正常地生长发育，决定着最重要的生理学过程——光合作用、色素合成、光周期现象和其它生理现象的光谱区，通常称之为辐射的生理有效区，或称为生理辐射。在这个波长范围以内，量子的能量能使叶绿素分子处于激发状态，并将自己的能量消耗在形成处于还原形式的有机化合物上，这段光谱称为光合有效辐射，即进行光合作用的那一部分光谱区，简称PAR。光合有效辐射的波段大体在可见光（400—760nm）范围以内，即400—700nm 或 380—710nm的范围。太阳光谱中引起植物生理变化的生理辐射，其光谱范围比可见光谱广泛一些。

用以测量太阳辐射的辐射仪是一种对光谱无选择，而对光谱的能量有同等响应的仪器。这类仪器所测到的是包括从紫外到远红外的全部辐射能量值。然而，对光合作用而言，并非太阳光所包含的所有光谱的光都可利用，图2.6是植物叶片光合作用的作用光谱（$P_\lambda$）及作为比较的标准明视觉函数曲线（$V_\lambda$）。被植物吸收并利用的光是在400—700nm范围中，并且在这段光谱范围内的光也不都同样有效。理想的光合有效辐射的测量探头就是具有与作用光谱（$P_\lambda$）相同的光谱响应特性。但是由于测量技术问题，把400—700nm范围的光作为光合有效辐射是可行的。

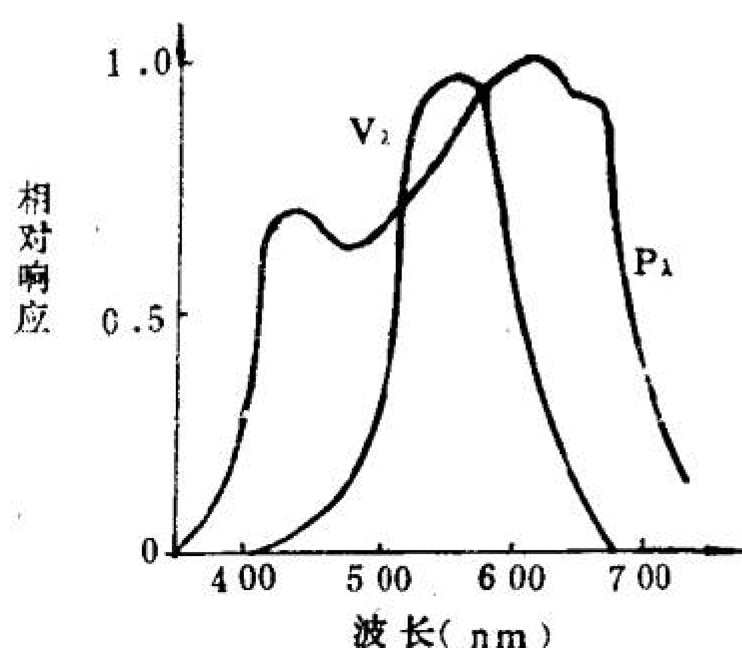



图2.6 叶片光合的作用光谱（$P_\lambda$）与标准明视觉函数曲线（$V_\lambda$）的比较（H.A.Eфимова，1977）

目前，在越来越广泛地研究植物光合作用的生产力时，人们趋于使用光合有效辐射的资料。在农业气象研究中，考虑进入播种地后被植物吸收与反射以及土壤吸收和反射的种种辐射能量的有关农田光合有效辐射资料，对于确定光合作用和产量形成的辐射能利用系数和拟定最适农业群体结构等方面来说都具有重要意义。

## 二、光合有效辐射的计算

光合有效辐射与约占太阳总辐射一半的可见光波长范围十分接近，粗略地说，光合有效辐射约占太阳总辐射的50%。

要比较精确地求取光合有效能量，一般可以通过两个途径去实现。一是进行严格的对比观测，即在同时同等天气状况下，实施两类仪器的同步观测；二是以个别的观测点资料作为分析的依据，通过气候学计算方法，求得光合有效辐射，这是目前求得光合有效辐射的主要手段。

当太阳辐射穿过大气层后，它的光谱成分要发生变化。太阳高度角、大气混浊度、水汽、尘埃微粒、$CO_2$以及臭氧成分等的不同，均可引起太阳总辐射值Q的变化及相应的光谱成分的变化，

总辐射中的光合有效能量的比例也相应发生变化。

到达地表的太阳总辐射Q，由太阳直接辐射S与天空散射辐射D组成，其表达式为：

$$\int_{200\,nm}^{4000\,nm} Q(\lambda)d\lambda = \int_{200}^{4000} S(\lambda)d\lambda + \int_{200}^{4000} D(\lambda)d\lambda \qquad (2.4)$$

式中，$\lambda$为辐射能的波长，定积分的上下限是人为确定的，因为小于200nm及大于4000nm的波长所占据的能量百分比，其实际意义不大，因此取为上下限。如果以$K_S$表示可见光波长范围内的直接辐射（$S_\varphi$）与总的光谱范围内直接辐射$\left(\int_{200}^{4000} S(\lambda)d\lambda\right)$之比，$K_D$表示可见光波范围内的天空散射辐射（$D_\varphi$）与总的光谱范围内散射辐射（$\int_{200}^{4000} D(\lambda)d\lambda$之比，则有：

$$S_\varphi = K_S\int_{200}^{4000} S(\lambda)d\lambda \qquad (2.5)$$

$$D_\varphi = K_D\int_{200}^{4000} D(\lambda)d\lambda \qquad (2.6)$$

$$Q_\varphi = S_\varphi + D_\varphi = K_S\int_{200}^{4000} S(\lambda)d\lambda + K_D\int_{200}^{4000} D(\lambda)d\lambda \qquad (2.7)$$

上式中，$Q_\varphi$即为所求的光合有效辐射能量。如果能确定两个系数$K_S$及$K_D$，相应的$S_\varphi$及$D_\varphi$也就可以求得。观测证明，$K_S$与$K_D$是不等的，必须分别求出。

按照定义，$K_S$的基本含义即为以下的数学形式

$$K_S = \frac{\int_{380}^{710} S(\lambda)d\lambda\Big|_h}{\int_{200}^{4000} S(\lambda)d\lambda\Big|_h} \qquad (2.8)$$

式中，$K_S$表示太阳高度为h时地表面所接受的在某一波长范围（$\lambda$）内的太阳直接辐射量。因此$K_S$在一日中随着太阳高度的变化是不一致的，同时也随大气混浊度$\tau_0$而变化（图2.7）。$K_S$的

变化范围，一般小于0.5，考虑到大气质量、水汽含量、大气混浊等影响，每日的$K_S$值平均在0.39—0.45之间，理论最大值为0.478。苏联及我国早期计算光合有效辐射时多取0.43。

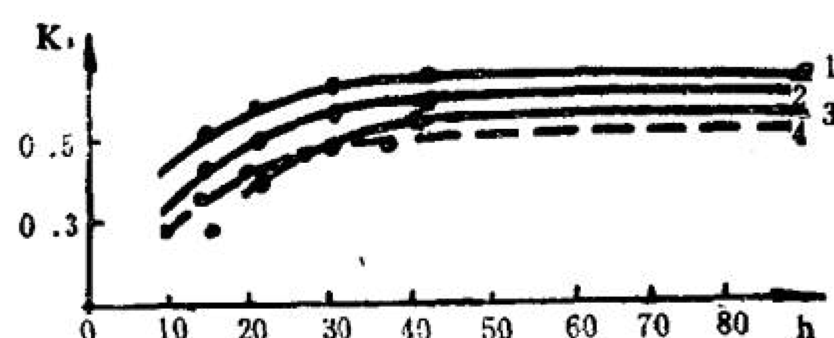



图2.7 在不同的大气状态下$K_S$随太阳高度h的变化

1. $\tau_0=0.2$相对于轻微混浊大气的条件
2. $\tau_0=0.3$相对于中等条件
3. $\tau_0=0.5$相对于严重混浊大气的条件
4. 虚线，相对于理想的干洁大气

$K_D$的计算要比$K_S$复杂。中国科学院地理研究所经过实地观测发现，$K_D$的变化在碧空条件下与太阳高度h关系不大。当时采用遮光照度计与遮光天空辐射表同步在不同太阳高度角下实测，表明它并不随大气质量的变化而变化，也基本上不随太阳高度的变化而变化，$K_D$值在一日内是比较稳定的。但在长波区（红外区），$K_D$值随太阳高度的增大而非线性增大；在短波区（紫外区），则随太阳高度的增大呈非线性减小。

$K_D$随不同的天气状况（如碧空、云天及阴天）变化不大。根据观测和理论计算，$K_D$占无云天空全色散射辐射的69%—64%，平均为65%；阴天仅占56%—42%；在中云密布时，同晴天条件下入射的辐射相比，无论是总辐射、还是光合有效辐射，其绝对值都有所减少，而光合有效辐射在全色辐射中的比重则有增加。当有大量低云时，其值更小。苏联研究人员认为光合有效辐射在云天全色散射辐射中的比重平均为0.57，其计算光合有效辐射的简便公式为：

$$Q_\varphi = 0.43S + 0.57D \tag{2.9}$$

式中，$Q_\varphi$为光合有效辐射，S为水平面上的直接辐射，D为散射辐射。经过计算对苏联境内作物生长期中所有月份总体来说，光合有效辐射日总量之差不超过3％。我国华北地区光合有效辐射计算的$K_S$、$K_D$取值分别为0.415和0.56。

上述$K_S$、$K_D$的确定不够充分与精确，还有待于深入研究。

## §3　光照长度[1]对植物的影响

日长是一种在一定地方各年之间比较稳定的气候因素，所以气候工作者对此不太注意。在许多农业地区，降水、蒸散和温度是作物生长的主要限制因素。在温带，限制地区生产力的，常是太阳辐射和温度；而在热带地区，那里可以周年种植，温度不受注意，水分成为主要的环境因素。但是光周期或光长也曾经造成作物歉收和妨碍新品种的引进。植物许多形态上和发育上的变化也往往与光周期有关。

### 一、植物的光周期现象

（一）光周期现象的概念

光周期现象是指植物生长发育对昼夜长短的不同反应。即白天光照和夜晚黑暗的交替与它们的持续时间对植物的开花有很大的影响，称为光周期现象。这是植物内部节奏生物钟的一种表现。自然季节的光周期变化使每天光长按规律加长或缩短。它是对植物内部节奏的信号，植物知觉到光照长度的变化，由此来识别一年内时间的推移，因而光周期现象事实上是利用对光长的测量控制植物生理反应的现象。

自然界中很多植物的开花对光照长度非常敏感。有的只有在光照长度超过一个临界值（临界光长）时开花，否则停留在营养状态，这类植物称为长日性植物，如麦类作物、豌豆、菠菜、油菜、甜菜、向日葵、胡萝卜、亚麻等，原产于高纬度地区。这类

1）　光照长度（也称光长）和日照长度不同。前者包括日照长度以及只有漫射光的多云天、阴天时段和曙暮光时段。

植物的开花通常是在一年中光照较长或光照逐渐加长的季节里。对这类植物，如用人工方法延长光照时间，也可促使其提前开花。

有的植物只在光照长度短于一定临界值时开花，这类植物称为短日性植物，如水稻、大豆、玉米、甘薯、棉花等，原产于低纬度。这类植物通常在春季或秋季开花，若用人工方法缩短光照时数，也可促使提前开花。

还有一些植物属于中日性植物和中间型植物。中日性植物是指当昼夜长短的比例接近于相等时才能开花的植物，如甘蔗。中间型植物是指开花受光长的影响较小，只要其它条件适合，在不同的光长下都能开花，如番茄、黄瓜、四季豆、番薯、早熟的荞麦等。

（二）临界光照长度

植物分成短或长日性类型，需要有一个客观的光照时数标准。长日性植物要求光长不能短于这个界限长度，而短日性植物相反，不能长于这个界限长度。短于或长于这个长度，长、短日性植物都不能开花结实，而始终保持营养生长状态，这个界限长度即为临界光照长度。临界光照长度是植物识别合适季节的度量，其数值与生境有密切关系。以往研究光周期现象时，认为它们的界限是每日12小时光照，实际上，不是任何植物都如此。有的短日性植物如苍耳，临界光长可达16小时，而有的长日性植物如天仙子，临界光长仅12小时。临界光长的数值随植物生境的纬度而改变。一种野生水稻品种，当它在北半球比原生境北移一度，或在南半球南移一度时，临界光长平均加长3.5分钟。对光长反应敏感的植物，例如，有些水稻品种对仅差48分钟的光长就起反应，其发育速率可因此改变50到60天。这类例证说明植物可通过光周期控制的反应来辨别季节。即使在近赤道地区，那里的光长随季节的变化很小，也有对光周期敏感的植物，它们也只是在一定的季节内开花。

光周期反应中受温度的影响较小。当温度分别控制在18℃和28℃下，高凉菜开花的临界光长没有改变。但是温度对开花的数量有很大的影响。极端的高温和低温可能完全排除光周期控制，只要光周期反应未被极端的温度排除，临界光照长度便基本上与温度无关。

（三）对光周期有效的光强及感应时期

1. 对光周期有效的光强

由于在夜间用基本不能进行光合作用的弱光照射，仍然有延长光照长度的效果。人们可以认为，光周期反应与光合量无关，即与光合作用强度无关。

弱光的作用是常见的现象，如农田附近有路灯，往往可以看到灯光所及范围的水稻不能进行花芽分化和抽穗，即使抽穗，抽穗期也会延迟，因为水稻是短日性植物，延长光照长度就不能或推迟诱导花芽分化。这说明植物对光周期感应的光是十分敏感的，路灯的光强也能产生光长效果，使短日性植物的成花过程受到抑制，路灯光强一般仅10勒克斯。

光照长度和生理反应强度之间的关系不仅对强光有效，对很弱的光强也有效。当太阳还在地平线下6°左右时便开始，黄昏时太阳已落到地平线下6°左右停止，这期间常称光照时间。其阈值约为1—3勒克斯。这个阈值一般仍在月光强度之上。在温带地区，满月的光强不超过0.25—0.5勒克斯。月光通常不影响光周期现象对季节的适应，就是由于这个原因。在实验和园艺实践中，可以用远低于自然光强的人工光照控制植物开花。根据闪光试验，常常一次不太强的闪光已足以使开花或不开花的过程颠倒过来，如苍耳，只要10—100勒克斯的光强就有效了。但是从总体看，如果光照强度过弱，也会降低开花反应，这是因为花芽的分化和形成需要营养，所以许多短日性植物在光周期诱导暗期之前和之后给以强光照，能促进其开花反应，特别是暗期之前的强光照反应更为突出。长日性植物也是如此，对于敏感的长日性

植物，如莳萝，诱导光的形成通常需要进行 4 个长日照处理，给予强光时，则只要一次即可诱导成功。

2． 光周期感应的时期

植物的光周期所感应的是光期长度、还是暗期长度，光、暗期的比率是否起作用？图2.8的实验结果作了说明。在 8 小时光

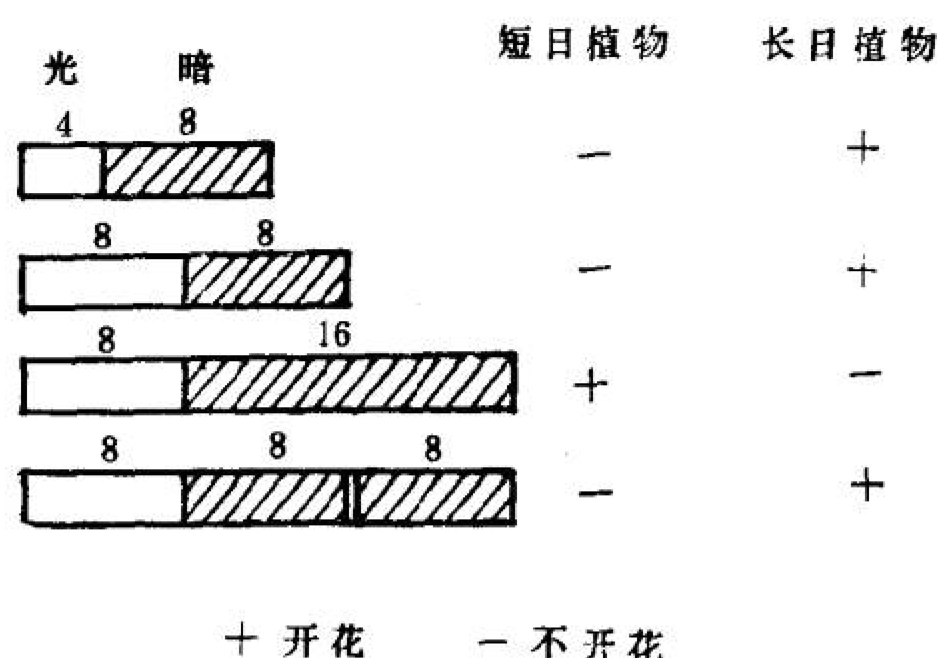



图2.8 光暗期比例和光中断长夜对长、短植物的开花效应

期与16小时暗期相互交替（光周期之比为 1：2）的典型短日条件下，短日性植物进行花芽分化，而长日性植物则不进行花芽分化。但是，如果 4 小时或 8 小时暗期构成光暗交替，且光暗之比仍然为 1：2，光期是足够短的，尽管如此，短日性植物却不进行花芽分化，而长日性植物却进行花芽分化。另一方面，即使在 8 小时光期与16小时暗期构成的短日条件下，如在暗期中间进行短暂的光中断处理，短日性植物也不能进行花芽分化，而长日性植物可以分化花芽。由此得到以下结论：

（1）在光周期所引起的成花诱导中，重要的因素既不是光期长度，也不是光、暗期之比，而可能是暗期长度。如不给予短日性植物一定时间以上的暗期，就不能进行花芽分化；相反，如给予长日性植物一定时间以上的暗期，也不能进行花芽分化。

（2）即使给予足够长的暗期，如暗期中途给以“光中断”，暗期效果即消失。

在研究植物光照阶段的发育速度时，有人提出暗长积量的概念。将水稻光照阶段内的每日暗长之和称为暗长积量。水稻只有满足该品种所需要的暗长积量时，才能完成光照阶段，并且完成光照阶段的日数与暗长积量的关系近似地呈抛物线函数关系。

（四）光周期性形成的生态条件

很多研究说明植物的光周期性与它们原产地的生态条件有关。凡是栽培植物原产于冬季为旱季的地区，如中国南部、印度、中美洲的栽培植物是短日性植物；而起源于夏季为旱季的一些地区，如中亚、近东、地中海地区的，则多为长日性植物。澳大利亚的一种牧草（Themeda australis）起源于热带，但现在有短日、长日与中日性三种类型：在南半球低纬地区（6—15°S）收集来的大部分生态型均为严格的短日性植物；从较南纬度（17—43°S）收集来的大部分生态型是长日性的；从更南较寒地区来的还有春化反应，这种对生态条件的适应性在原产西非的高粱、以及原产热带或亚热带的水稻上也很明显。它们在逐渐推向温带栽培时，在人工与自然选择过程中降低了对短日照的要求。此外，原产北美的苍耳对不同纬度的光周期也有明显的适应性，最北的只要求夜长7.5小时就可以开花，而在南方墨西哥和夏威夷的，则要求夜长10.75—11.00小时才开花。

我国的杂交水稻研究工作也指出，我国各地晚熟水稻品种光周期诱导期（光照长度敏感阶段）是在各地区7月初自然光照由长变短的时候开始，约经一个月左右完成诱导，这些品种都不同程度地属于短日性；反之光周期诱导期是在光长由短变长的条件下进行，则属于中日性，或属于长日性（在长日下反较在短日下提早抽穗）。中国科学院上海植物生理研究所利用人工气候室进行了160多个水稻品种的光周期反应的研究，说明水稻虽然是原产于热带或亚热带的短日性植物，由于适应了温带气候条件，除了

大部分为短日性品种外，已有少数长光性和中间性（在日长12—14时抽穗最早）品种类型形成，因此植物光周期性的形成是与原产地发育期间自然光照的绝对长度和它的变化趋势有着密切的关系，并在人工选育的条件下，可以改变它的特性。

## 二、光长对植物生长发育的影响

### （一）对营养生长的影响

光周期对植物营养生长有一定的影响。一般先抑制茎生长而促进叶扩大。如光长影响豆类和某些草莓品种的叶片大小，长日使小黄瓜的叶片变薄而根系较大。在短日下莴苣和萝卜地上部分对根的比率较大，所以，短日对莴苣种植有利。

光长显著影响某些草莓品种的营养生长，长日照比短日照能促进葡萄茎的生长，短日照延缓植物生长并最终使生长停止，从而使得该植物即使在较高温度下仍然能于长日照下生长良好。这种情况就明显地限制着低纬度地区的草莓生长季节。

光周期对于种子的萌发、温带林木的叶片脱落、树梢休眠也起重要的作用。

在实际条件下，光长影响也伴随着其它因素的影响。在同样的太阳辐射强度下，光合速度随着光照长度的增长而增加。J.L.蒙蒂斯通过理论上的计算提出，当日射量为1675.72焦耳/米$^2$，光周期自12小时增加到16小时时，光合速度增加15%。有人将98个国家大田玉米产量和太阳辐射、夜温和日长作过多元分析，发现日长与产量间的相关最显著，所以将优良的玉米品系栽植于热带地区，使其正常生长发育是极困难的。表2.4是每10°纬度带内玉

**表2.4 每10°纬度带内的玉米平均产量与日照长度**

| 纬度(N、S) | 5°N—5°S | 5—15° | 15—25° | 25—35° | 35—45° | 45—55° |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 国家数 | 10 | 27 | 23 | 15 | 12 | 11 |
| 平均产量(千克/公顷) | 998 | 1018 | 1190 | 1788 | 3920 | 4714 |
| 光照长度(时：分) | 12:13 | 12:35 | 13:03 | 15:50 | 14:43 | 15:40 |

米平均产量与光长的关系，可见，光长大于14.5小时的地区，对玉米产量形成最为有利。

（二）对开花的影响

光周期最明显的作用是对花的诱导效应。对光周期敏感的短日性水稻来说，超过光周期长度的临界期便不开花。临界期不仅在植物种间不同，在同一种植物的不同品种间也不相同。

为了形成花原基，植株应在其幼年时期或基本营养生长期之后，接受特定的最低限度的光诱导周期数。这种最低限度的要求因物种或品种而异。水稻的周期数为5—24，依品种和光周期而异。为了花原基的进一步发育，增加光周期数可能是必要的。水稻品种在穗原基发生上，可能至少需要10个光诱导周期，而圆锥花序从叶鞘中伸出，也需要增加光周期数。许多植物如果树接受的光周期数不够，会产生不完全花、同株雌雄比例改变，或者结实率很低。

要求光诱导周期在一个以上的植物，通常全部周期应连续进行。短日性植物光诱导周期如于深夜受到光照的干扰，或被非诱导性光长所代替，就可能阻止或抑制开花。

对于光周期敏感的大豆品种，增加光诱导周期数对花原基的发育是必要的。把三个大豆品种种植在短日照下，很快开花，虽然在长日照条件下延长处理时间它们也能开花，但短日照对结实仍是很重要的，因为在长日照下发育的花药缺少有生活力的花粉。

光周期敏感的短日性水稻品种在菲律宾14°N的地方于1月、2月、3月播种，会出现开花推迟或紊乱的现象。如果把一个水稻品种经短日处理后置于长日条件下，则光诱导处理以前形成的分蘖开花；处理当时形成的分蘖有的开花，有的不开花；光诱导处理以后形成的分蘖不开花。所以光周期敏感的水稻在14°N年初播种，它们处于光长渐增的条件下，在光长超过临界长度之前形成的早期分蘖，开花正常，但是迟生的分蘖经受的短日照天数较少，因而开花推迟；在光长变得长于临界周期之后形成的分蘖，则完

全不开花。

由短日引起的短日性植物提早开花，对株型影响也很大。提早开花，植株的叶面积和干物重都可能比正常的植物小，株型较矮，分枝和分蘖数也较少。在泰国和菲律宾曾报道光周期敏感品种由于延迟种植而获得较高的产量，这是由于光周期敏感的水稻品种延迟种植可以造成较矮的株型，不易互相遮荫的缘故。

对于作物的产量，只有在生殖器官充分发育的情况下才能高产。而对另一些作物如甘蔗、烟草、茶叶和饲料作物，生殖器官发育延迟或受阻时都可高产。

作物品种之间收获量所需的生育期差别很大，而全生育期因播种期的不同而不同，光长往往通过作物生育期的长短进而影响产量。据报道，为了确定生长期长短对稻谷产量的影响，曾将一个对光长敏感的水稻品种通过控制光周期，经过一段预定的时间而开花。该品种仅在光周期短于约11.5小时的情况下开花。为控制其生育期天数，给该品种以14小时的光周期，经过不同的持续期，然后给以10小时的光周期诱导，81天开花，约 115 天成熟的处理获得了最高的产量。较早或较迟成熟的产量都低。在田间条件下，生长期短的品种没有时间去产生足够的分蘖或叶面积，而那些生长期长的植株长得太高、多叶，低层光照差，获得的养分少。为了高产，在一定地区和栽培技术下，生长期有一个高产的最适值。它能够通过控制分蘖数、叶面积、光传入和营养进行调节。

最适生长期的重要性也表现在引种上，如引入热带地区的某些大豆品种，开花不是过早就是过迟，两种情况下干物质生产和产量都受影响。温带品种种植于热带，其生长期的缩短可能由高温引起，而开花推迟或者不开花则是光周期的作用。

（三）植物感光性

每种作物的不同品种虽属同一类型，但对光照长短的要求仍有差别，有的甚至对光长的反应已不明显。这是由于它们在原种

植地所处的纬度和季节的光照条件以及耕作栽培技术长期不同所造成的结果。我国水稻虽属短日性植物，但南到海南岛，北到黑龙江，从平原到海拔2400米都有栽培，并已形成了很多对光照要求各不相同的类型。在满足水稻所要求的温度条件下，在短日条件下可使生育期缩短，在长日条件下可使生育期延长，这种因光照长短而使生育期延长或缩短的特性，称为水稻的感光性。

丁颖等人根据地理分期播种的联合试验(8个点，158个品种，共播15期)，用温度相近，但光长相差较大的两地同一品种在同一播期下的出穗天数之差与光长较长之地的出穗天数的比值的百分数作为出穗促进率，并以此定感光性的强弱。出穗促进率大，表示短日促进出穗作用大，称为感光性强；反之则称为感光性弱。按出穗促进率的大小，把供试品种感光性分为9级，如表2.5。以

**表2.5 水稻感光性级别**

| 感光性级别 | | 短日出穗促进率(%) |
|---|---|---|
| 弱 | 1 | 负值—0.0 |
| | 2 | 0.1—5.0 |
| | 3 | 5.1—10.0 |
| 中 | 4 | 10.1—15.0 |
| | 5 | 15.1—20.0 |
| | 6 | 20.1—30.0 |
| 强 | 7 | 30.1—45.0 |
| | 8 | 45.1—60.0 |
| | 9 | >60.0 |

此为基础，验证了广州、天津两点11小时定光试验结果。我国水稻感光性为：早稻感光性一般属弱，其中早籼稻为1—3级，早粳稻为1—5级。中稻感光性一般属弱到中等，幅度很大，其中中籼稻1—5级，中粳稻2—7级。晚稻感光性强，为7—9级，籼稻强于粳稻。极大多数作物对光照长度有强烈的反应，它们的

播种期以及它们种植的纬度范围是受到严格制约的。图 2.9 是在菲律宾洛斯巴诺斯地区三个水稻品种播种到开花日数和当地光照长度变化图，可以看出Raminad Strain 3 号水稻品种的敏感性。在14°N地区，其最佳生长期限制在 5 —12月，如果在这个时期以外播种，生长期就延长。在花开始分化以前，要求光长短于12.5小时，因此于日本36°N处种植，要在11月的某个时候开花，易遭霜冻害。在靠近热带地区，如印度尼西亚和马来西亚种植，其光

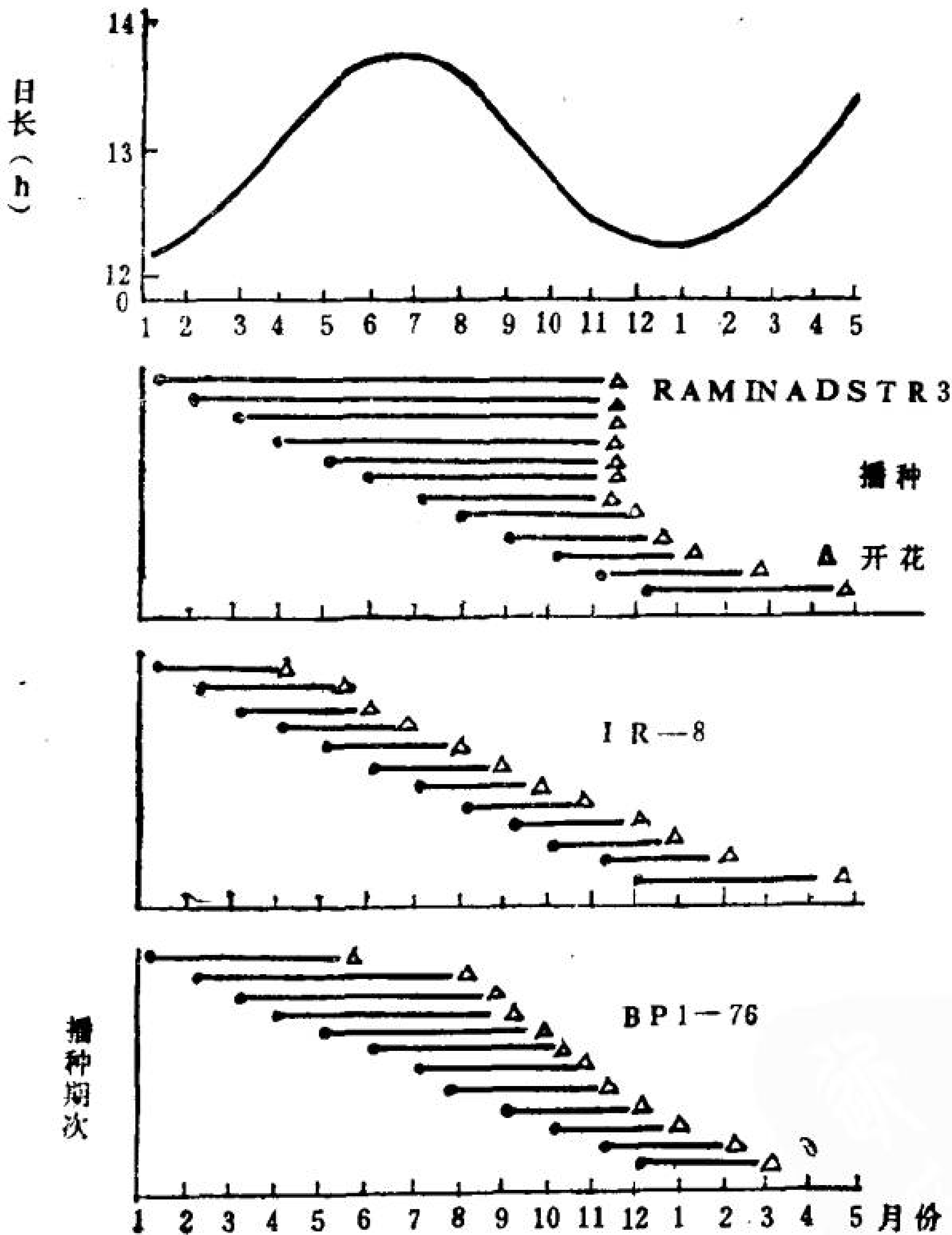



图2.9 三个水稻品种的播种期和开花期和洛斯巴诺斯（14°N）的光长波动（L.P.Smith等人，1975）

长不会小于12.5小时，因而不能开花。光周期不敏感的IR—8品种，就可以忽视播种期和种植纬度而有一个均匀的生长期。许多植物的生长期实际还受其它因素诸如温度、营养、水分供应和光强等的影响，如对于IR—8，温度的影响就很明显。

**三、光周期学说在农业生产上的应用**

（一）引种

不同的作物与品种具有不同的光周期性和感光性，而不同地区与季节的光照时间不同，所以在不同地区引种工作中，必须注意作物的光周期特性及引种地区的光照特点。现仅就光照长短对作物生育期的影响进行讨论。

（1）短日性作物的北方品种向南引种时，由于光照变短，温度增高，导致生育期缩短，可能出现早穗现象，穗小粒少。南方品种向北引入时，由于光照变长，温度降低，导致延迟成熟，甚至不能抽穗开花。

南种北移，早稻感光性弱，易获成功。晚稻感光性强，适应范围狭窄，要特别注意。例如，华南早稻中熟品种引至华中分别作早、中稻栽培，表现最好，产量最高，但晚稻早熟品种只能引至长沙，中迟熟品种到韶关以北就不能黄熟。

（2）长日性作物的北方品种向南引种时，一般延迟成熟。但南方温度较高，生育期是否延长，还要综合考虑。南方品种向北引种时，一般提早成熟，但北方温度较低，发育速度减慢，因此，生育期的长短也应综合分析。

（3）纬度和拔海高度相近的地区相互引种，光温条件大致相同，生育期变化小，较易成功。如江苏南京11号水稻品种引至川、鄂、湘等省获得成功，便是东西引种成功的例子。

（4）在同一地区，平原与高原间相互引种，其延长或缩短的日数，决定于高度差引起的温度变化。

（5）在同一地区，早中稻作晚稻种植时，提早成熟；而晚稻过早播时，延迟成熟，因此在双季稻区，早稻可用作晚稻栽培，

而晚稻不能用作早稻。当然，早晚稻生育期的长短，要考虑光、温特性的综合影响。

相对说来，各地的光温条件还是比较稳定的因素，而各地的栽培条件和技术措施是可变的因素，因此有些品种特性只要大致能适应当地的光、温条件，就可通过改变可变因素而引种成功以至高产。

（二）育种

杂交育种常因亲本花期不一，给育种工作带来困难。采用人工光照处理，即根据亲本对光长反应的特性人为地延长或缩短光照时间，便可使亲本延迟或提早开花，促使花期相遇。

（三）其他

了解光照长度对植物的影响，对防御农业气象灾害也有作用。如北方某些地区冬小麦易遭晚霜冻害，若种植对光长高度敏感的冬小麦品种，使拔节期延迟，就可能躲过晚霜冻害。利用作物长短日照特性，也可以促进人们所需要的营养器官的发育而提高产量。如甘蔗为短日性作物，把南方品种引入，晚熟当早熟栽培，生育期延长，产量提高。

## 四、光照长度与植物发育关系的解释

长时期以来，人们用光周期学说说明光长对植物开花的影响。用光照阶段学说来解释时，认为植物发育对光暗反应是在一定的具体阶段——光照阶段中进行，并非在全生育期或笼统的开花以前进行。最近的研究表明，高等植物对光照长度的反应决定于植物光敏色素系统。

不同波长光谱对植物生长发育的影响，各人论点虽不尽同，但可见光谱组成对植物生育产生不同影响以及其对不同植物的影响也不相同的看法是一致的。不同植物对不同光谱的要求是其在长期生活环境下自然选择的结果。从表2.6和2.7看出，在不同纬度的夏季，当一日里太阳高度位于30°以上和以下时，不仅光谱组成的比例不同，光照时间也不同，因此，不同纬度下的植物形成了对

**表2.6 太阳不同高度太阳光谱各波段光强占总辐射的百分比(A.Φ.克列什宁，1963)**

| 辐射种类 | 波长(nm) | 太阳距地平面高度（度） | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 0.5 | 5.0 | 10.0 | 20.0 | 30.0 | 50.0 | 90.0 |
| | | 占总辐射的百分数（%） | | | | | | |
| 紫外线 | 295—400 | 0.0 | 0.4 | 1.0 | 2.0 | 2.7 | 3.2 | 4.7 |
| 可见光 | 400—760 | 31.2 | 38.6 | 41.0 | 42.7 | 43.7 | 43.9 | 45.3 |
| 紫色光 | 400—440 | 0.0 | 0.6 | 0.8 | 2.6 | 3.8 | 4.5 | 5.4 |
| 蓝色光 | 440—490 | 0.0 | 2.1 | 4.6 | 7.1 | 7.8 | 8.2 | 9.0 |
| 绿色光 | 490—565 | 1.7 | 2.7 | 5.9 | 8.3 | 8.8 | 9.2 | 9.2 |
| 黄色光 | 565—595 | 4.1 | 8.0 | 10.0 | 10.2 | 9.8 | 9.7 | 10.1 |
| 红橙光 | 595—760 | 25.1 | 25.2 | 19.7 | 14.5 | 13.5 | 12.2 | 11.5 |
| 红外线 | >760 | 68.8 | 61.0 | 58.0 | 55.3 | 54.6 | 52.9 | 50.0 |

**表2.7 夏至日在不同纬度地平线30°以上和以下的可照时数**

| 地名 | 纬度 | 夏至日太阳在地平线30°以上和以下的时间 | |
|---|---|---|---|
| | | 30°以上 | 30°以下 |
| 榆林 | 18°10′ N | 8小时40分 | 4小时31分 |
| 广州 | 23°10′ N | 8小时42分 | 4小时48分 |
| 南京 | 32°04′ N | 9小时20分 | 4小时52分 |
| 北京 | 39°54′ N | 9小时14分 | 5小时44分 |
| 哈尔滨 | 45°45′ N | 9小时24分 | 6小时17分 |
| 列宁格勒 | 60°00′ N | 9小时32分 | 9小时19分 |

光谱组成的不同要求。原在低纬地区生长的短日性植物，一日里太阳高度在30°以下的时间较短，30°以上的时间几乎比前者多达一倍，30°以上的时间内，短光波的百分比较大，因此，植物长期适应的结果，就使短光波对短日性植物产生影响。原在高纬地区的长日性植物，一日里太阳高度在30°以下的时间相对较多，长波光占绝对优势，长波光对其产生影响，形成需要长波光的长日性植物。

光照长度还对植物的一些特征如外部形态（主茎、叶数、株高、每株穗数等）、叶片发育与脱落、休眠、营养器官的相对大

小、花青素的形成，抗寒性以及贮藏物质的积累等都有着不同程度的作用。

## §4 光照强度及其对植物的影响

### 一、光强与光合作用

在植物生育适宜温度和正常$CO_2$浓度的条件下，单叶光合作用强度受到光强的影响。一般单叶光合作用强度是多种因子的函数，布德科夫斯基（Budugovsky）和罗斯（Ross）以下式表示

$$P_e = f(Q_e, C_e, T_e, S_e, r) \quad (2.10)$$

式中，$P_e$为叶子光合作用强度，$Q_e$为叶面光合有效辐射强度，$C_e$为靠近叶面的$CO_2$浓度，$T_e$为叶温，$S_e$表示叶子水分状态的指标，r表示无机养分含量的指标。光不仅通过其有效辐射强度直接影响光合作用速度，而且通过叶面积的热量平衡，间接地控制光合作用的进行。若其它条件一定，在$CO_2$低浓度区（$<0.1\%$），$P_e$值与$CO_2$浓度几乎呈直线关系。

（一）光与植物生产

在一定的光照强度范围内，并在植物生长发育适宜的外界条件下，光合强度随着光照强度的增强而增强。当光强超过一定限度时，光强再增大，光合强度并不相应增强，它以一个最高值为渐近线而不再上升，这种现象称为光饱和现象。光—光合作用曲线大体呈双曲线型。

$C_3$植物如水稻、小麦、大麦、大豆等光饱和现象下的光合产量大约为15—40毫克/分米$^2$·时。$C_4$植物如玉米、甘蔗等有较高的光合作用能力，其光合产量约为40—80毫克/分米$^2$·时(图2.10)。

图2.11是群体的光照强度与光合产量关系的示意图。这种关系随群体繁茂程度有明显差异。在平均单位面积的土地上，当叶面积较小时，比较弱的光就能达到光饱和；随着叶面积增大，光饱和的光照强度增大；对于非常繁茂的群体，可能不出现光饱和现象。因繁茂程度引起的光合产量差异，通常是在弱光下小，在强

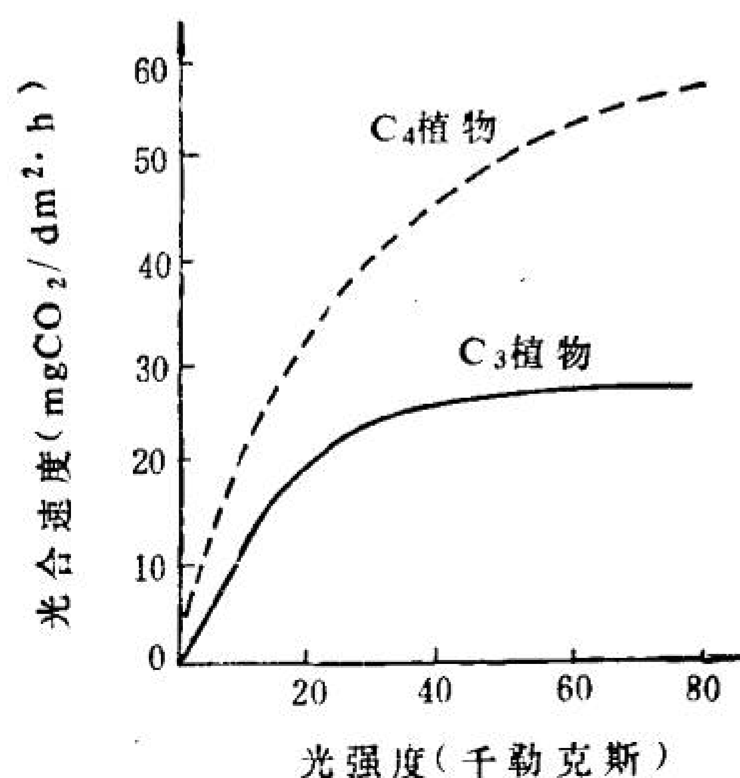



图2.10　光对单叶光合作用的直接影响
（$C_3$植物13种平均，$C_4$植物9种平均）

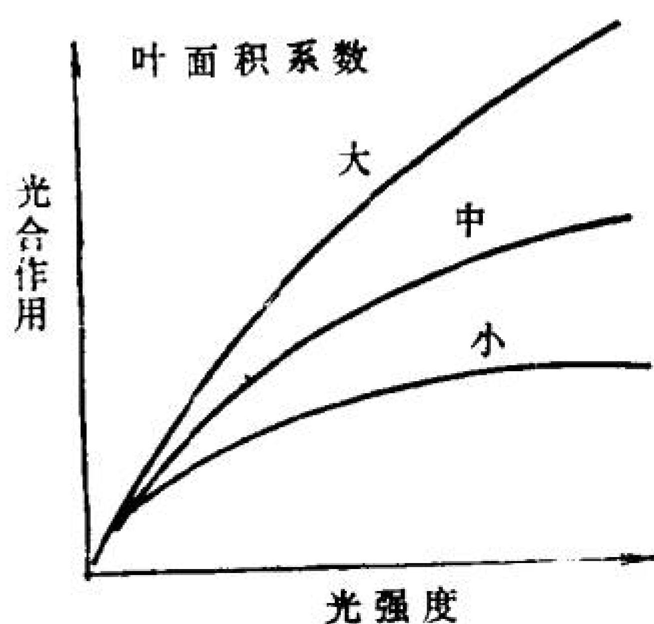



图2.11　不同叶面积系数的光一光合作用示意图

光下大。

不同植物的光照强度与光合作用关系曲线不同，图2.12是在接近自然条件下各种植物的光一光合作用曲线。可见$C_4$植物如玉

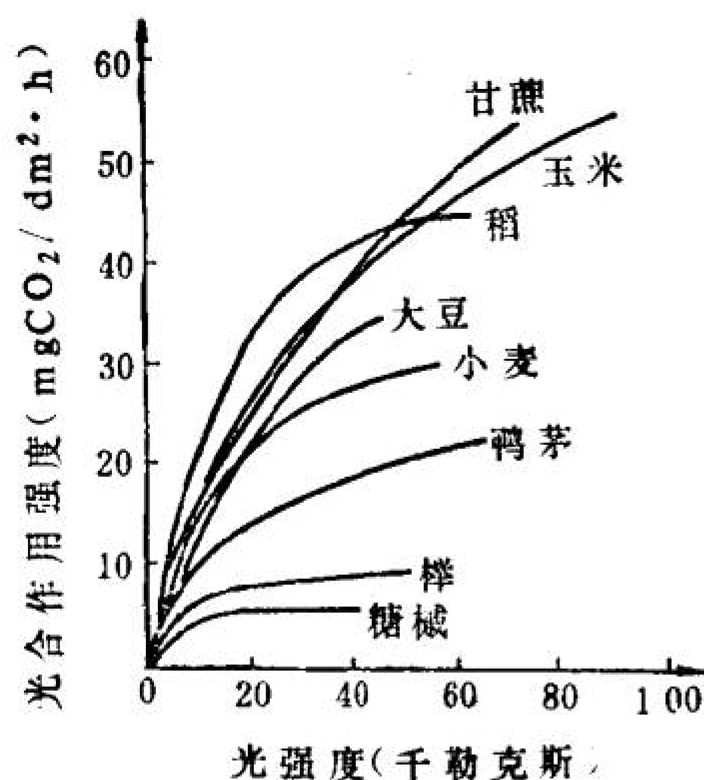



图2.12　各种植物的光一光合作用曲线
（$CO_2$浓度0.03%）

米和甘蔗的光—光合作用曲线，甚至在10万勒克斯也未达到饱和，成为所谓不饱和型的光—光合作用曲线。相反$C_3$植物的水稻、大豆、小麦等作物的光—光合作用曲线，只要处在4—6万勒克斯光强下便达到饱和。这是由于玉米等$C_4$植物$CO_2$固定反应系统的能力较高，光合速度不受$CO_2$固定反应速度的影响所致。最近莫斯（Moss）等人指出，$C_4$植物的气孔活动比之$C_3$植物受光强的支配尤为强烈，因而构成光—光合作用曲线的差异。

（二）光强的变化与光合作用

在自然条件下，植物叶子所受的光强，不是恒定的。投射到地表的光强，随着云层的有无而变化。即使投射于地表的光强为一定量，由于风速引起冠层摆动，叶片随风飘摇，叶子上接受的光强也有所不同。

很早以前，曾应用闪光、间歇照光研究小球藻释放$O_2$的速度。在间歇照光条件下，比之相同的光强连续照射的处理，供试材料所受光能量减少50%。研究还表明，光期与暗期长度各为7.5秒处理的光期与暗期平均光合作用强度降低30%，而$0.38\times10^{-3}$秒处理的则只降低4%，说明光期之后由于跟着暗期，则光期所受光能的利用效率提高。

在自然条件下，植物叶子遭受光变动的周期，也因风速及其他条件而异，据研究以0.1—10秒左右者为多。同时光的变动幅度，以晴天出现光斑的场合为大。可以认为，由于强光—弱光缓慢交替而能提高光能利用效率的现象，在现实生产上也会出现。

间歇照光能提高光能利用效率的原因，可以解释为：在强光持续照射时，光合作用的暗反应过程便成为限速阶段，就是说，在这样的条件下，与光反应产物数量相比，$CO_2$受体以及$CO_2$固定酶水平相对较低，而且$CO_2$固定初级产物的还原速度，也处于相对缓慢状态。为此，光反应产物或中间产物便不能顺利地被消耗而有过剩现象。这些产物中的不稳定物质不断地分解，结果，聚积的光能白白地被浪费掉。而紧接光期之后就插入暗期，由于光期

所产生的光反应产物被消耗，反应能顺利进行，过剩现象减少，光能白白浪费的现象减少。

图2.13是加斯特拉(Gaastra,1959)对芜菁叶子进行的不同光强周期交替处理的光合作用强度的变化。它表明光强发生改变时，光合作用强度不能立即达到稳定值。当从弱变强时，光合作用达到稳定状态所需的时间（十几分钟至数十分钟）比从强变弱所需时间为长。这是因为在强光下，$CO_2$扩散过程容易成为限速阶段，而光合作用强度则受到气孔开闭动态的巨大支配的缘故。

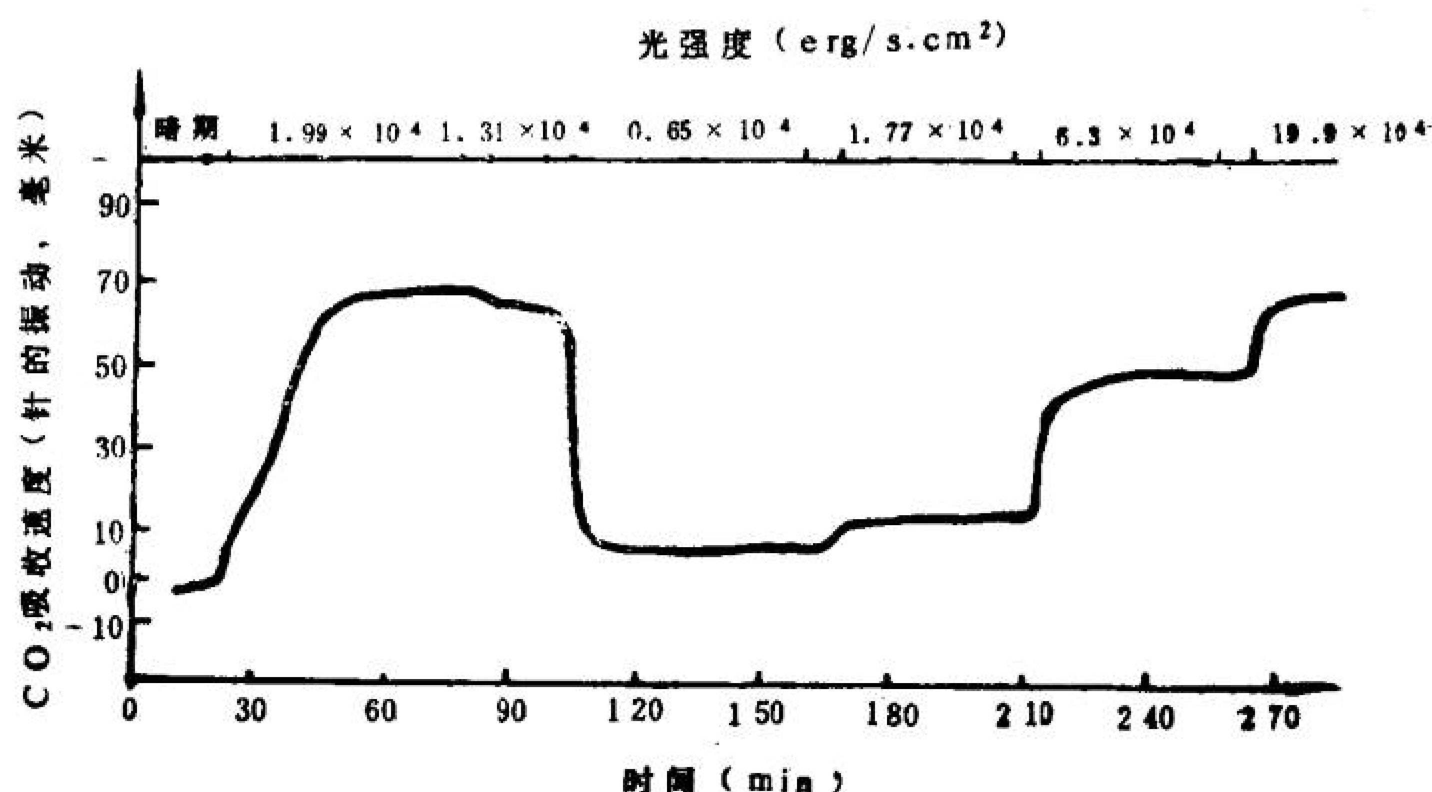



图2.13 光强度交替处理条件下光合作用强度状况
(Gaastra, 1959, 引自《作物的光合作用与物质生产》一书)

### （三）光饱和点与光补偿点

光强增强时，光合量也增加，光强达到一定强度时，光合量不再增加，这种现象如前所述，称为光饱和现象。这个光的临界点称为光饱和点。叶片只有处于光饱和点的光强下，才能发挥其最大的制造与积累干物质的能力。在光饱和点以上的光强不再对光合作用起作用。

植物的光合强度和呼吸强度达到相等时的光强值称为补偿点。在这一光强下，光合作用制造的产物与呼吸作用消耗的产物

相等。在光补偿点以上，植物的光合作用超过呼吸作用，可以积累有机物质。在光补偿点以下，植物的呼吸作用超过光合作用，此时非但不能积累有机物质，反而要消耗贮存的有机物质，如长时期在光补偿点以下，植株将逐渐枯黄以至死亡。

光饱和点与光补偿点随植物而异。喜阴植物在海平面全光照十分之一或更低时即达光饱和；喜阳植物，尤其是荒漠植物或高山植物，在中午直射光下还未达到光饱和。对于水稻、小麦等$C_3$植物，光饱和点为3—5万勒克斯。$C_4$植物的光饱和点一般比$C_3$植物高。耐阴植物的光补偿点为几百勒克斯，而喜阳植物的光补偿点达1000勒克斯以上。

作物群体的光饱和点和光补偿点均较单叶为高。如小麦单叶光饱和点为2—3万勒克斯，而群体在10万勒克斯下尚未达到饱和。这是因为当光强时，群体上层叶片虽已饱和，但下层叶片的光合强度仍随光强的增加而增强，群体的总光合强度还在上升。同样，群体内叶片多，相互遮荫，当光照弱时，上层叶片还能进行光合作用，但下层叶子光合作用弱，呼吸作用强，所以整个群体的光补偿点较高。

据日本对水稻测定的结果，群体光饱和点在本田初期为3万勒克斯，最高分蘖期为6万勒克斯，孕穗期光饱和点消失，此期间光照越强，光合生产率越高，乳熟期光饱和点无显著降低。对小麦也曾观测到拔节后光饱和点两度消失的情况。

实际上，光饱和点与光补偿点随叶面积系数、$CO_2$含量、温度、土壤有效水分等因子而变化，它不是一个常数。

**二、植物群体的光合产量**

为估算植物的平均光合作用速度，必须建立在单叶光合作用的基础上，再考虑时间和空间要素，进行时空积分。

单叶接受光照强度与光合作用强度关系可以用直角双曲线表示：

$$P = \frac{bI}{1 + aI} \qquad (2.11)$$

式中，P为光合作用强度，I为叶子所受光强，a、b为常数，可通过实验求得。当$I \to \infty$时，$P \to b/a$；$I \to 0$时，$P \to bI$，光饱和点时光合强度为b/a，系数b为光—光合作用曲线起点处斜率。

在大多数作物群体中，叶子的空间排列是任意的，但也可以把叶子处理成是按垂直轴的任意排列。在知道叶子的垂直分布后，就有可能描述日光在叶间穿过时向下的减弱规律，也有可能估计辐射能在叶子表面的复杂分布方式。为了简化，假定叶层是均匀的介质，光在群体中的分布，平均辐射量随叶面积系数的增加而递减，即符合比耳(Beer)定律：

$$I(F) = I_0 \exp(-kF) \qquad (2.12)$$

这里$I_0$为冠层的光强，k为群体叶层光强衰减系数。其求算用

$k = \frac{-\ln I/I_0}{F}$，测得群体顶部及各层次的光强及各层次以上部分的叶面积之和F。据门司和佐伯计算，在草中k为0.3—0.5，水平叶子的作物层中为0.7—1.0，而在密集的葡萄丛中则远小于1.0。在理想介质中，k值是介质中所含吸光物质的浓度和其吸光系数所决定的。实际上，大田内部情况很复杂，叶片大小、厚薄、表面光滑度、叶绿素含量及其排列等都要影响叶片吸收、反射和透射性质及大小，从而影响k值大小；入射光的方向和成分也对k值产生影响，特别是叶片的角度、平铺或直立，影响较大。k值也随季节、天气、时间、作物株行距等而变化，因此k值不是稳定的。有人将群体分成几个层次，各个层次的k值取不同值。但实际应用中，禾谷类作物中的光强衰减系数较稳定，因而使用平均值代替。表2.8是中国科学院上海植物生理研究所1959年在松江测得的水稻叶层光分布和光强衰减系数资料。

将(2.12)式代入(2.11)式，并考虑作物的呼吸，就可以计算一定光强下任意一层叶面的总光合强度

表2.8 叶层的光分布及光程衰减系数

| 层高(cm) | 光强$I/I_0$(%) | 光强对数 $-\ln I/I_0$ | F | k |
|---|---|---|---|---|
| 30 | 5 | 3.00 | 4.06 | 0.74 |
| 40 | 8 | 2.53 | 3.74 | 0.68 |
| 50 | 13 | 2.04 | 2.99 | 0.68 |
| 60 | 20 | 1.61 | 2.37 | 0.67 |
| 70 | 32 | 1.14 | 1.54 | 0.74 |
| 80 | 48 | 0.74 | 1.00 | 0.74 |
| 90 | 100 | 0.0 | 0.30 | |
| 平均 | — | — | — | 0.71 |

$$P = \frac{bI}{1+aI} - r$$

$$= \frac{bI_0e^{-kF}}{1+aI_0e^{-kF}} - r \tag{2.13}$$

式中P、a、b、$I_0$的含义同前，k为叶层光强衰减系数，F为所测高度以上的叶面积系数，r为单位叶面积的呼吸作用强度。整个群体的净光合强度就是各层叶面积净光合作用强度的总和，即：

$$P_{净} = \int_0^F \left(\frac{bI_0e^{-kF}}{1+aI_0e^{-kF}} - r\right)dF$$

$$= -\frac{b}{ak}\ln\left(1+aI_0e^{-kF}\right)\Big|_0^F - rF$$

$$= \frac{b}{ak}\ln\left(\frac{1+aI_0}{1+aI_0e^{-kF}}\right) - rF \tag{2.14}$$

从整个群体看，不同的群体结构，即F不同，光合作用的净生产量是有变化的。P不同，a、b也有相应变化，它们之间不全是线性关系。因而，$P_{净}$不会随F的增大而相应增加，从数学意义上说，存在有极限值，因而净生产率达到最大值时的叶面积系数才是最适叶面积系数（图2.14）。最适叶面积与最大限度叶面积并不一致，而且前者的出现常比后者为早。叶面积大到一定限度，

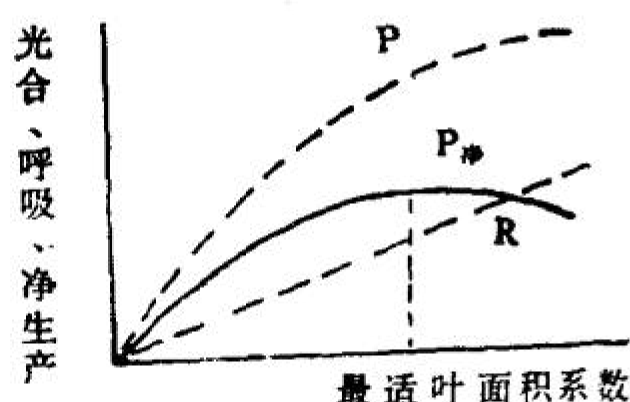



图2.14　叶面积系数与光合作用

无论怎样调节群体光强衰减系数，最下层叶片仍然只能接受到光补偿点以下的光强。

从公式（2.14）可以求得最适叶面积的表达式。将该式对F求一阶偏导数，并使之等于零，同时考虑到作物呼吸时间约为光合时间的2倍，则可得到最适叶面积（$F_{opt}$）的表达式：

$$F_{opt} = -\frac{1}{k}\ln\frac{r}{I_0(b-2ar)} = \frac{1}{k}\ln\frac{I_0(b-2ar)}{2r} \qquad (2.15)$$

r可以通过实测确定，b、a则由叶片光合特性所决定，主要是F与k能有一合适的比例关系，群体的光强衰减系数在很大程度上决定于叶面积的大小。

光—光合作用之间的这种双曲线型的关系，现在已广泛应用。在建立作物—产量模式，估算作物产量是很有效的。但如进一步分析，也可发现两者之间的关系并不完全如此。首先对光合作用估算，仅反应了光与光合作用的关系，事实上与温度、$CO_2$浓度及其它条件也有关系，计算效果在光合作用较弱时较好。a，b也不一定是常数。有人认为估算公式中，还应包含温度和叶片含氮量等因子。

光合作用的估算也可通过其它的途径，如根据$CO_2$同化量的吸收、输送、测定$CO_2$吸收过程中各个阻力，模拟电路来求取。但这种方法进行估算，其过程要复杂得多，当$CO_2$梯度测定及叶面阻

力测定存在困难或误差大时，应用便有困难。

### 三、光照强度对植物生长发育的影响

植物的生长是以株高伸长、体积增大、体重干重增加、有机物质及所含能量的增长等形式而表现出来。光通过光合作用是导致有机物质及其所含能量增多的因素。在农业气象学中，研究光强对农作物生长发育的影响，常采用遮光法，也可以盆栽，将遮光与不遮光的植株进行对比分析。遮光可以是整个生育期，也可选择其中一个生育期或某一生育期中的几天，视研究目的而定。

减弱光强对总干重及籽粒重的影响很大。表2.9和表2.10是江苏农业科学院1982年的小麦遮光试验，选择拔节至抽穗期为遮光时期。在一般情况下，小麦生长期内群体接受的自然光强常低于群体的光饱和点，所以随着光强的减弱，光合量显著降低，且减光天数越多，小麦的产量构成要素各部分受到的影响越大。

表2.9 不同光强对小麦干物重的影响

| 遮光处理 | 总干重(克/米$^2$) | 各部分所占百分数（%） | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 根 | 茎叶 | 籽粒 |
| 对照 | 780 | 5 | 63 | 32 |
| 30% | 600 | 3 | 63 | 34 |
| 60% | 380 | 3 | 66 | 31 |
| 90% | 90 | 2 | 97 | 1 |

表2.10 遮光天数对小麦产量构成各要素的影响

| 遮光天数 | 单株成穗 | 无效分蘖 | 小穗数 | | | 每穗粒数 | 减产(%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 合计 | 结实 | 不实 | | |
| 对照 | 2.87 | | 22.50 | 17.49 | 5.02 | 37.09 | |
| 10 | 2.49 | 15.26 | 22.46 | 16.72 | 5.74 | 34.64 | 12.5 |
| 20 | 2.23 | 28.70 | 21.56 | 16.64 | 5.92 | 30.35 | 34.2 |
| 30 | 2.15 | 33.49 | 21.68 | 14.07 | 7.60 | 26.85 | 44.2 |

光强的减弱，即使是同等程度、同样天数，在不同的生育时期，其对作物生长的影响也是不同的。所谓临界光期就是光强的

变化对作物产量影响最大的时期。表2.11是开花后不同时期遮光对小麦粒重的影响，可见在小麦开花后11—20天内减光对粒重影响最大，因为这时正是小麦灌浆速度最大的时期。

**表2.11 小麦灌浆期不同时期遮光对产量要素的影响**

| 项 目 | 对照 | 遮光时间（开花后天数） | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 1—10天 | 11—20天 | 21—30天 |
| 每穗小穗数 | 22.5 | 21.4 | 21.3 | 21.5 |
| 每穗结实数 | 42.2 | 30.9 | 37.8 | 39.3 |
| 每穗粒重（克） | 0.94 | 0.49 | 0.45 | 0.46 |
| 千粒重（克） | 22.2 | 15.9 | 13.2 | 16.4 |

（戴云玲，1965）

不同作物品种的光合效能有差别，因而遮光所造成的光合能力降低程度也不同。纳雅克（Nayak S.K.）研究水稻品种对低光强适应能力时，选用了Vijaya和IR—8两个品种，在整个生育期（$T_1$）、最高分蘖到开花（$T_2$）、开花到收获（$T_3$）三个时期进行遮光处理，利用$C^{14}$测定光合率。在开花后5天三种处理的光合作用强度列于表2.12。发现用低光强处理的叶片，$C^{14}$光合能力减弱，品种间差异明显，IR—8在正常光强下，光合效率较高，而Vijava在遮光下光合效率较高，说明后者的耐阴能力比前者高，在两季种植颇为有利。同时处理$T_1$、$T_2$光合作用降低的百分率比

**表2.12 受人工遮光水稻的光合作用**

**（每分钟计数×10²/分米²·时）**

| 品种测定 / 遮光处理 | Vijaya | | IR—8 | |
|---|---|---|---|---|
| | 光合率 | 对照的(%) | 光合率 | 对照的(%) |
| 对 照 | 170.9 | 100 | 193.2 | 100 |
| 整个生育期 | 70.9 | 41.5 | 53.4 | 27.7 |
| 最高分蘖到开花期 | 59.0 | 34.5 | 52.0 | 26.9 |
| 开花到收获 | 140.4 | 82.1 | 115.2 | 59.6 |

处理$T_3$降低得多。

光照强度对植物的发育速度有影响。光强过弱，往往阻碍植物的发育速度，以致延迟开花结果。果树的研究工作早就明确光照对植物开花结果的重大意义。在纱幕遮荫下，果树开花结实不良。草本植物在高大植物遮荫下，延迟开花或不开花。В.И.拉祖莫夫在温室条件下，在白昼用自然光照处理14小时和夜晚用较弱的人工光照处理14小时，观测麦类作物的发育速度和单株产量，结果两者情况大不相同，足证光强对作物发育速度的显著影响(表2.13）。

**表2.13　不同光强下作物从播种到抽穗日数与单株重（克）**

| 栽培条件 | 光照强度（勒克斯） | 小麦 | | 黑麦 | | 燕麦 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 抽穗日数 | 单株重（克） | 抽穗日数 | 单株重（克） | 抽穗日数 | 单株重（克） |
| 白昼自然光照14小时 | 6000—18000 | 38 | 5.08 | 46 | 4.08 | 52 | 3.85 |
| 夜晚人工光照14小时（无夜晚低温影响） | 1000—3000 | 51 | 0.32 | 57 | 0.68 | 62 | 0.85 |

光强还影响产品质量。表2.14说明苹果果实质量的分布与冠内光强分布相吻合，即外围果实质量好于中部，中部好于内膛，上位果实强于下位。如果同是外围（或中部），则南向果实质量最佳，北向果实最次。果实质量主要表现在果实的着色面积的大小、含糖、含酸、硬度、果径大小等方面。经分析，这些因素都与光照强度呈线性关系。

实际上，光对作物的影响是从光照强度和光照时间两个方面起作用的。考虑这种综合影响，有人提出光照量度的概念。光照量度就是每昼夜植物所获得的光照能量的总和。在两者的不同组合下，其影响往往不同。增加光照强度，可以获得优质高产，但有时却又必须延长光照时间，产量才能提高。

表2.14 冠内光强与果实质量的关系（辽宁朝阳，1982）

| 项目＼观测点 | 距树顶0.5米 | 距树顶1.5米 | 距树顶2.5米 | 外围（距外围0.5米） | | | | | 中部（距外围1.5米） | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 平均 | 东 | 南 | 西 | 北 | 平均 | 东 | 南 | 西 | 北 |
| 日平均光照(lx) | 50125 | 35375 | 1250 | 41141 | 41750 | 50250 | 45188 | 27375 | 19756 | 15425 | 28600 | 20750 | 14250 |
| 相对光照（%） | 80.17 | 61.31 | 41.84 | 57.91 | 48.87 | 77.36 | 70.36 | 35.04 | 36.20 | 29.25 | 55.68 | 52.16 | 7.72 |
| 平均着色(%) | 63.0 | 62.0 | 8.0 | 56.7 | 56.0 | 62.0 | 58.0 | 51.0 | 26.3 | 21.0 | 29.0 | 24.0 | 21.0 |
| 红果率(%) | >80 | >80 | <30 | >80 | >80 | >80 | >80 | >80 | | 30—80 | >80 | 30—80 | <30 |
| 含糖(%) | 16.71 | 15.24 | 13.21 | 15.38 | 15.11 | 16.38 | 14.53 | 15.42 | 14.58 | 14.10 | 15.47 | 14.00 | 14.26 |
| 含酸(%) | 0.0772 | 0.092 | 0.084 | 0.103 | 0.100 | 0.104 | 0.101 | 0.104 | 0.096 | 0.081 | 0.100 | 0.101 | 0.100 |
| 硬度(kg/cm²) | 10.90 | 10.4 | 8.94 | 9.72 | 9.71 | 10.13 | 9.70 | 9.34 | 9.42 | 9.14 | 9.78 | 9.51 | 9.24 |
| 果径(mm) | 58.3 | 57.7 | 53.4 | 58.7 | 58.8 | 59.2 | 58.4 | 58.2 | 58.0 | 56.3 | 57.2 | 56.6 | 57.2 |

## §5 不同光谱对生物的影响

植物的生长发育是在日光的完全光谱下进行的。太阳辐射能的各种光谱到达地面上的比例因纬度、季节、地势与气象条件而异，但大体上比较稳定。其中不同的光谱成分对于植物的光合作用、叶绿素等色素的形成、向光性以及动物的生育等，光反应的作用是不一样的。光对光合过程的作用严格地限制在可见光谱之内，而且在可见光谱中不同波段下，光合强度不同，光合产物也不完全一致。

到达地球表面的太阳辐射大致分为三部分，紫外辐射、可见光及红外辐射。

### 一、紫外线对生物的影响

波长小于290nm的短紫外线对植物有伤害作用，波长越短，伤害性越大，有人称之为灭生性辐射。但由于高层臭氧层对它的大量吸收，一般达不到地面，不能危害地面生物体。

波长位于290—400nm的长紫外线，大多数学者认为它对植物的生活不起显著作用，也不影响它们的发育和产量。但也有人认为：集中在290—315nm范围内的紫外线对形成正常的植物有特别重要的作用，能加速植物发育。而315—400nm的紫外线在所有情况下都没有作用。紫外线辐射的抑制和促进作用与所用的剂量及植株的发育阶段有关。将植物置于能最大限度地透过365nm区域光线的玻璃滤片下，发现照射过的植株几乎难以确定其发育阶段的转换时间。在大剂量照射的情况下，可观察到花青素的出现，这与合成作用被破坏有直接的关系。紫外线的刺激或抑制作用还与温度有关。在温度升高时，小剂量的紫外照射能引起刺激作用，而在降温时，则抑制生长。

紫外辐射还对植物的向性、感性和趋性有很大的作用。当紫外线定向作用于根部，可观察到地上器官有向光性，这可能是类胡萝卜素的作用。

在动物饲养方面，可用它来检验动物产品的质量和新鲜程度。

## 二、可见光各个波段的作用

在各种光化学反应中，起决定作用的是叶片所吸收的光。叶片所吸收的以可见光和紫外线为主。这个波段区域对植物的生活机能具有决定性的作用。真正对有机物合成和产量有实际意义的，只是400—700nm 范围内的光，即光合有效辐射。其中最有效的部分为红橙光和蓝紫光。

蓝紫光部分为 400—510nm 之间。这是一个强的叶绿素吸收带和强的黄色素吸收带，它又是在可见光中强的光合作用活性光谱带。它的效率虽只及红橙光的一半，但对于植物的化学成分有强烈的影响，能促进蛋白质和脂肪的合成和数量增加。对叶子和质体的运动起主要作用。大多数情况下延迟植物开花。

黄绿光部分为 510—610nm。是一个低光合效率和无特殊意义的光谱带，同时也是一个弱活性带，叶子吸收较少。

红橙光部分为 610—710nm。它几乎是叶绿素最强吸收的光谱带，也是红光区域中具有最强光合活性的光谱带。在这个波段作用下，植物的光合作用、肉质直根、鳞茎、球茎等形成过程，植物开花过程和光周期过程都以最大的速度来完成。它对形成光学机构起着主要作用，对植物的化学成分也有强烈影响，形成碳水化合物多。

## 三、红外线的影响

红外线可分为近红外辐射和远红外辐射。两者对植物的影响不同。

波长大于 1000nm 的辐射为远红外辐射。对于植物无特殊效应，一旦被植物吸收，即转换成热能而不参加光化学反应过程。

波长在1000—710nm之间的辐射是近红外辐射。它是一个对于植物具有特殊伸长作用的光谱带，虽然伸长效应的光谱区并不准确地符合此带的范围，但人们已经肯定了这个光谱带的辐射通量对于植物的伸长效应。

730nm附近的远红外和波长660nm附近的红光影响长日性和短日性植物的开花，影响植物茎的伸长和种子萌发等。例如红光能促进莴苣种子发芽，远红光则抑制莴苣种子的发芽，这两种光的效应是相反而又是可逆的。如果将种子轮流放在红光和远红光照射下，种子是否萌发，则看最后一次辐射而定。最后一次是红光，则促进萌发，如果是远红光，则抑制萌发（表2.15）。

表2.15 红光和远红外对莴苣种子萌发的影响

| 照　射 | 萌　发 |
|---|---|
| 红　光 | + |
| 远红外 | − |
| 红光—远红外 | − |
| 远红外—红光 | + |
| 红光—远红外—红光 | + |
| 红光—远红外—红光—远红外 | − |

太阳辐射不同光谱对植物的效应见表2.16。

根据不同光谱成分对植物生长的影响，就可以用人工改变光质以改善作物的生长。近年来有色薄膜在农业上的应用，受到国内外的广泛注意。通过有色薄膜改变光质以影响作物、蔬菜的生长，一般都能起到增加产量、改善品质的效果。如用浅蓝色薄膜育秧与用无色薄膜育秧相比，前者秧苗及根系都较粗壮，插后成活快，分蘖早而多，生长茁壮，叶色浓绿，鲜重和干重都有增加。据测定粗纤维和粗淀粉以及全氮量和蛋白质的含量都较高。这主要是由于浅蓝色薄膜可以大量透过光合作用所需要的380--490nm波长的光，因而有利于植物的光合过程和代谢过程。再如黄色薄膜能促进黄瓜叶色浓绿、叶片肥大、防病、并能延长生长期，增产效果显著。不同波长的光对植物生理和形态所起的作用是一个值得进一步研究的问题，它将为农、林、牧业生产更广泛地应用有色薄膜提供依据。

**表2.16　各种光谱特征及其对植物的作用**

| 光谱组成 | | 波　长<br>(nm) | 量 子 能<br>(电子伏) | 爱因斯坦值<br>($10^4$克/卡*) | 植物对它的利用 |
|---|---|---|---|---|---|
| γ射线 | | | | | 达不到地面 |
| α射线 | | 0.001—0.018 | | | 极为有害，但达不到地面 |
| 紫外线 | 短紫外线 | <300 | <4.11 | >9.50 | 有害，一般达不到地面，对植物化学成分的形成有一定作用，对植物有抑制作用 |
| | 长紫外线 | 300—400 | 4.11—3.08 | 9.50—7.12 | |
| 可见光 | 紫 | 400—440 | 3.08—2.80 | 7.12—6.46 | 叶绿素吸收较多，对植物化学成分有强烈影响 |
| | 蓝 | 440—490 | 2.80—2.52 | 6.46—5.82 | |
| | 青 | | | | |
| | 绿 | 490—565 | 2.52—2.18 | 5.82—5.02 | 吸收很少，活性最小 |
| | 黄 | 565—595 | 2.18—2.08 | 5.02—4.80 | 对植物无特别意义 |
| | 橙 | 595—620 | 2.08—2.02 | 4.80—4.69 | 叶绿素吸收最多，有最大的活性，对植物化学成分有影响 |
| | 红 | 620—760 | 2.02—1.54 | 4.69—3.51 | |
| 红外线 | 近红外线 | 760—1050 | <1.54 | <3.51 | 引起植物伸长效应，有光周期反应 |
| | 远红外线 | 1050—3000 | | | 热效应 |
| 无线电波 | | >3000 | | | 不明 |

* 1卡＝4.18焦耳

# §6　光能利用率及其提高

## 一、光能利用率的概念与计算

动植物的产量直接或间接来自光合作用，光合效率的提高是生物高产的物质基础。植物一生中，光合效率高，制造和积累的有机物质就多，产量也就提高。而太阳辐射能是植物光合过程的唯一能源，所以提高单位面积产量，从能量角度看，就是提高太阳辐射能的利用效率。据估计，全球植物对太阳辐射能的平均利用系数仅为0.2%，而人类所消费的营养能量又只占它的0.5%，所以农业增产中，设法提高作物的光能利用率至为重要。

光能利用率是投射到作物表层的太阳光能或光合有效辐射能被植物转化为化学能的比率。但因人们采用不同参数而有以下几种表达形式。

光能利用率（$E_u$）可表达为：

$$E_u = \frac{H \cdot W}{\Sigma Q} \times 100\% \tag{2.16}$$

式中，H为每一克干物质燃烧时释放出的热量，也可定为单位质量的碳水化合物所含的热量，一般采用177929.00焦耳/克，W是测定期间干物质的增加量（也即净生产量），ΣQ是同期的总辐射量。据村田吉男的计算，日本不同地区$E_u$的平均值：水稻为1.20—1.58%；玉米为1.29—2.18%；大豆为0.77—1.02%等。

另一种方法可根据植物获得最高生长力时的光合有效辐射（PAR）和增加干物质所需的能量来计算其净光能转换率。

$$E_{uc} = \frac{H \cdot W}{\text{PAR的吸收量}} \times 100\% \tag{2.17}$$

比较$E_{uc}$和$E_u$值可看出，总辐射能（ΣQ）用植物实际吸收的光合有效辐射（PAR的吸收量）代替后，不仅能表示出除了叶面积不同、受光量不同外，还可体现光合作用机制的光能利用率来。

此外，还可根据某一时期增加干物质所需要的能量(H·W)，加上实测呼吸速度所消耗的呼吸能量（R·ΔE），再除以PAR吸收量而求得。

$$E_c = \frac{H \cdot W + R \cdot \Delta E}{\text{PAR的吸收量}} \times 100\% \tag{2.18}$$

还有以下两种表达式：

$$E_p = \frac{H \cdot W}{PAR} \times 100\% \tag{2.19}$$

$$E = \frac{H \cdot W + R \cdot \Delta E}{PAR} \times 100\% \tag{2.20}$$

式中，PAR为投射到单位面积群体上的光合有效辐射能。

## 二、影响光能利用率的因素

光能利用率是估算生产潜力的前提，农作物光能利用率的估算一般均假设其它环境因素和作物因子处于最佳状态，根据光资源的多寡进行估算。生产潜力是在一系列最优条件组合下（如温度、水分、养分、土壤以及人与社会经济条件等），植物所能达到的生产力，这是植物的理论生产力，它仅取决于植物的光能利用率。

如前所述，照射到叶面上的太阳能量只有一部分被叶子吸收。而被吸收的那部分太阳能中，大部分又转变为热能消耗于蒸腾和呼吸作用，或者增高叶温而重新散失到空中，少量的能量又在辐射过程中损失掉，剩下的只有极少部分被光合作用所利用。到目前为止，无论是自然植被，还是栽培植物，光能利用率只有千分之几到百分之几。森林的光能利用率一般只有0.1%，生长季节中也只有1.5%左右。长江、黄河流域亩产千斤的稻、麦，全生长期的平均光能利用率只有0.5—3%左右，只有在最有利的条件下，才有可能出现较高的光能利用率。

影响植物群体的光能利用率的因子，主要有光合面积、光合时间和光合能力。

### （一）光合面积

光合面积主要指叶面积。要提高植物群体的光能利用率，使单位土地面积上生产出更多的产品，首先要有足够的叶面积以截获更多的日光能，才能使单位面积土地上植物吸收的光能总量增加。如果群体的总叶面积小，虽然其中的单株能得到较充分的光照，但群体的生产力，即单位面积土地的产量仍比郁闭的群体低。所以在农业生产中，在一般单作的情况下，群体常采用合理密植的方式来提高光能利用率。叶片的繁茂程度与光能利用率的高低直接有关。在一定范围内，叶面积系数与光能利用率成正比。但叶面积过大时，反而降低群体总叶片的平均光合作用率。要使群体有最大的光能利用率，就应求出最适叶面积系数值。据测定，大豆的最适叶面积系数约为3.2，玉米约为5.0，小麦约为6.0—

8.8，水稻约为4.0—7.0。

在作物群体内，最适叶面积系数还须与适合的叶片开张角和叶片配置方式相结合，才能更大程度地提高作物群体的光能利用率，因为叶片的配置方式直接影响叶片的受光量。一般叶形小、呈直立状态、叶层分布上小下大、呈塔形，叶面积系数较大的，光能利用率就较高。禾谷类作物密植时，直立叶片冠层比水平叶片冠层较有利于增加群体内的透光率，使中下层叶片的光合潜力能得到较好发挥，从而提高整个群体的光能利用率。此外，不同的水、肥措施也会影响叶片的开张角度。

（二）光合时间

光合时间是指作物在整个生育期间或在全年中利用太阳光能进行光合作用的时间。适当延长植物的光合时间，可以增加体内有机物质的积累而提高产量。为了延长光合时间，农业栽培管理主要从两方面入手，一是延长叶片的寿命，即延长叶片的功能期，防止叶片早衰。对禾谷类作物来说，每张叶片特别是近穗叶片的寿命的长短对籽粒产量有极为重要的作用；二是适当延长植物的生长期。我国的间作套种是增加光合面积、延长光合时间，从而提高光合效率的有效措施。

（三）光合能力

当植物的环境因素处于最佳状态（包括大气中$CO_2$浓度为正常含量）时，植物的最大净光合作用速率称为光合能力。于沪宁等人在威廉（Williams）和约瑟夫（Joseph）提出光合生产图解模式的基础上，将光合生产的过程分为三个阶段来剖析，并提出了各阶段的限制因素（图2.15）。

第一个阶段是能源和原料的输送阶段。光及$CO_2$通过辐射及扩散，进入植物层直达叶绿素内的光合作用反应中心，并进行再分配。

当太阳光线通过植物体时，光线穿过表层向底部逐层透射，穿过第一层叶片后的能量，其强度经过衰减，再传递到第二层叶

| | | |
|---|---|---|
| 1. 能源和原料的输送阶段 | 大气中的$CO_2$ 太阳光辐射<br>反射<br>湍流扩散<br>叶层 | 主要限制因子<br>1. 总辐射收入多寡及光合有效辐射所占比例<br>2. 植物群体的反射、漏射、照射在非光合器官的能量<br>3. 植物体蒸发、蒸腾、植物体与空气湍流交换耗热<br>4. 光及$CO_2$的饱和点、补偿点<br>5. $CO_2$扩散输送效率和空气中$CO_2$浓度、气孔阻力等 |
| 2. 能量的转化阶段 | 气孔<br>叶绿素内光合作用反应中心;无机物转化为有机物光能转化为生物化学能 | 1. 量子效率<br>2. 光呼吸和暗呼吸的能量消耗<br>3. 暗反应的运转效率<br>4. 初步合成的碳水化合物向贮藏器官的输送效率 |
| 3. 生物化学阶段 | 叶子中初步合成的碳水化合物需要输送到其它器官中去，用于贮藏或生长发育，或转化成还原程度更高的化合物 | 1. 经济系数——收获部分占总生物学产量的比重<br>2. 歧化作用*降低自由能 |

图2.15 光合生产过程和限制因素

* 歧化反应指相同的离子（或分子）在一定条件下，由于相互传递电子或原子（团）而起的化学反应，结果离子（或分子）的一部分被氧化，另一部分被还原。

子，又经过衰减后再往下传递。对于生长良好，郁闭度很高的农作物来说，光能在作物层的透射量实质上是不会很大的，基本上可以看作它将完全为作物的茎叶所吸收。据实测，在植物底部的光强（当植物叶面积系数达到最大时），只相当于顶部光强的 1％左右（表2.17）。

**表2.17 通过植物叶子透射后，不同光谱的能量变化**

| 叶层 | 550nm | 700nm | 950nm |
|---|---|---|---|
| 透过第一层叶子 | 0.14 | 0.20 | 0.42 |
| 透过第二层叶子 | 0.02 | 0.04 | 0.18 |
| 透过第三层叶子 | 0.0028 | 0.008 | 0.075 |
| 透过第四层叶子 | 0.0004 | 0.0016 | 0.032 |

光线照射到植物冠层后，必然发生反射，其数值相对来说还比较大。植物叶片的反射率，一般在 8 —10％。随着植物覆盖率

的增加，反射率增大。

被植物冠层所吸收的光合有效能量，并不全部用来进行光合作用。因为植物所吸收的能量中有一部分是被植物的不含叶绿素的非光合器官所吸收，对于进行光合作用来说，显然是无效的。这些能量被非光合器官吸收后，即转化为热能，并且很快释放出来，以另一种方式在植物的整个能量平衡过程中起作用。

植物对于接受到的光强有一定的反应。光合反应速率与光强本身有特定的关系。当光强达到一定数值后，光强继续增加，光合速率并不增长，即达到光饱和点。每种植物有不同的光饱和点，尤其是$C_3$植物，在光—光合作用曲线上反映得很明显。光饱和点随着环境中的$CO_2$浓度及温度等因子而有很大的变化。在正常$CO_2$浓度下，一般达不到$CO_2$饱和点。根据限制因子理论，某过程进行速度受到多种因子控制时，该过程的速度只受到其中最少量的因子所决定。图2.16是在高、低$CO_2$浓度下，光强与光合作用速率关系的示意图。

植物吸收的光能还要用于蒸腾和对空气的放热。这些能量的支出，是植物生理活动所必须的。

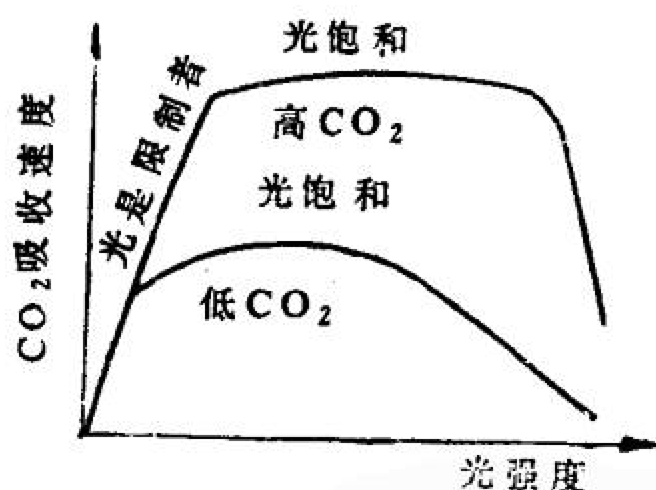


图2.16 高、低$CO_2$浓度下，光强与光合作用速率的关系

第二个阶段是能量转化阶段。无机物转化为有机物，光能转化为生物化学潜能。在这个阶段，植物所吸收的光能总值与其体内实行反应后所累积的能量是不相等的。植物吸收的相当大的一部分能量，由于植物本身的生理生态特性、自身的生长发育规律、形态结构特点以及光化学反应的基本规律等方面原因，有部分光能损失掉了。损失掉的光能，不可能成为光化学反应的能量基础，这一部分能量所占的比例相当大，因此，光能

利用率是不高的。此外，还主要决定于量子效率。实际上，由于种种因素的影响，比如环境因子的组合没有处于最佳状态，$E_{max}$值是不易达到的。另外，光呼吸消耗及向贮藏器官的输送效率都影响光合效率。当然，如今后能应用生物工程，改变植物的遗传基因，并改善在光合反应中的不利环节，光能利用率是能够提高的。

第三个阶段是生物化学阶段。叶子中初步合成的碳水化合物用于生长发育和转送到其它器官贮藏，或转化为还原程度更高的化合物。这一方面决定于前面光合生产所合成的物质；另一方面更大程度地取决于植物的内在因素。如遗传性状、经济系数、生物化学反应速度等。

此外，光合作用也依赖于温度、水分等其他外界因子，所以设法改善这些生境条件，也能提高植物的光能利用率。例如，$CO_2$同化和还原的进程随温度的增高而加速，因为温度能影响酶的活性，当温度过高时，光合作用速率开始下降。这是因为呼吸作用在高温下急剧增高，光合功能在高温下加速破坏的缘故，如酶开始钝化、各种反应的相互作用被扰乱、细胞和叶绿体的超微结构发生变化等。光合作用对温度的依赖关系，还决定于光合作用同化$CO_2$的速度和呼吸作用放出$CO_2$的速度的差值。

各类植物光合作用的最适温度范围不同。$C_4$植物净光合作用的最适温度在30℃以上；$C_3$植物的净光合作用的最适温度则较低。阳性植物的净光合作用最适温度为20—30℃；耐荫植物比阳性植物为低，一般为10—20℃。

水分对光合作用的影响主要是通过气孔开闭而影响$CO_2$的交换。随着干燥度增加，原生质的水合作用减低，从而降低光合能力；供水适量时，$CO_2$吸收增多，超过一定范围，$CO_2$吸收又开始减少。$C_4$植物的光合作用对于失水的反应比$C_3$植物敏感。

### 三、光能利用率的提高

从影响光能利用率的因素看，有些是难以改变的，如入射光

能总量及量子效率等，但是，到达群体冠层后，不少因子却可通过农业技术措施来改善农田小气候条件，从而在不同程度上削弱或加强它们的影响，以提高光能的转换效率。

提高作物光能利用率的基本问题是要探明作物产量的内在生理及外在生态因素，以便能自由地调节和控制这些因素。作为一个群体，着重的是单位土地面积上的收获量，所以提高光能利用率的基本途径不外是改进个体和群体的光合生产，改善栽培措施和提高技术水平。即一方面从个体角度上培育或筛选光合效能高和低光呼吸的种或品种；另一方面通过耕作改制和栽培技术水平的不断改进来实现。

（一）增加植物对太阳能的吸收比例，减少透射、反射和漏射损失

1. 增加群体中光合作用面积，即增加吸收太阳光能的叶面积

合理密植是充分利用光能、空间、地力、提高植物光能利用率的重要措施。合理密植的关键是栽植密度要合理，既要有一个较大的叶面积系数，但又不能过大。如果叶面积系数过大，会使叶片互相遮荫，植株中、下部的光照减弱，结果反而降低总叶片的平均光合作用率。过于密植还会引起田间通风不良，不利于作物层内 $CO_2$ 的运输和供应，易引起倒伏、病害等现象。合理密植的限度是最适叶面积，即当群体净光合生产率达到最大值时的叶面积。

2. 造成群体中多层立体配置

我国生产实践证明，高产水稻品种的株型是茎短而挺，分蘖挺直，分蘖力强。这种株型是抗倒伏的重要基础。倒伏影响叶片展开，使群体下层光照减弱，光合强度低；倒伏和弱光又进一步使光合产物运输受阻，秕粒增多。分蘖强而直立，可使叶面积发展较快，有较多的入射光透入冠层，在依靠主茎夺取高产的前提下，不要求有太多的分蘖，就能使稻苗生长比较均匀，光能利用率提高。

高产水稻品种还要求叶挺举，短而小，叶片较厚，叶色浓绿。短而挺的叶片比长而披的叶片在群体中分布均匀，因此群体光照条件充分而匀。特别在水稻幼穗的减数分裂期和开花期，对弱光很敏感，光照不良，严重影响开花受精，增加不实率。因此叶挺举、短而小，就从上到下有较好的光照条件，上层的光不致超过光饱和点太多，下层不致在光补偿点以下。叶片厚、色浓，增加叶片对光的吸收能力，减少叶片的反射作用，增强光合强度，单位叶面积光合率较高。

由株型、叶型造成的多层立体配置，把绿色叶面分成许多层。上层绿色面留有一定空隙，透入一定量的光到第二层，而第一、第二层绿色面所反射的光又透入第三层，反射、透入直到最下层。这样，同样强度的太阳能，却减少了反射、透射、漏射的损耗，进行光合作用的绿色面大大增加。不能利用的饱和点以上的光强通过多次反射、透射到了中、下层绿色面。下层有一定的光，便尽可能地保证了较多绿色面的光强在补偿点以上继续进行光合积累。

需要指出，作物的立体种植，广义说是立体农业，它是近年发展起来并已广为推行的种植方式，是充分利用光能的有效措施。

（二）增加农作物生长的日数，高效地利用全年太阳能进行光合生产

作物的生长是由小到大的，对成熟植株合适的栽植密度，在苗期就显得过稀，会有大量太阳光漏射到地面上浪费掉，而苗期往往占作物整个生育期的三分之一左右，因此如何挖掘这一段时间的光能利用潜力，是农业增产的一个重要问题。间作套种则是解决这个问题的有效措施。它能充分利用时间和空间，使田间作物始终有旺盛的群体，保持较高的光能利用率。

间作套种也提高了复种指数，延长了生长季节，较充分地利用了各种资源，从而提高了光能与土地利用率。植物光能利用

率最高的时期是生长盛期，此期间前后光饱和点较小，而生长盛期天数一般只占全生育期的三分之一左右，因而尽量利用前茬作物多余的光进行光合生产，就可以弥补单位土地上叶面积的不足，而后茬作物又在前茬作物收获后很快发展到生长最旺期。如套种作物的生长盛期在春、夏、秋复种指数达到200%以上，则田间高光合效率的旺期延续到几乎整个生长季节（图2.17），这样就能充分地利用生长季节的太阳辐射能，从而大大提高群体的全年光能利用率。当然，也较好地利用了热、水、气等资源。

间作套种还把单作的间歇用光变为套作的延续交替用光，延长了群体的光合时间，同时加大了总体光合面积。如三茬套种比二茬套种或单作，一般全年累积叶面积系数增加1/3—1/5左右。在作物搭配合理的情况下，间、套复种的作物群体此兴彼衰，叶面积系数也此起彼落，在总叶面积大幅度增加的情况下，叶面积系数保持连续、匀称、协调的状态，并可延续交替用光，也有利于群体光合率的提高。

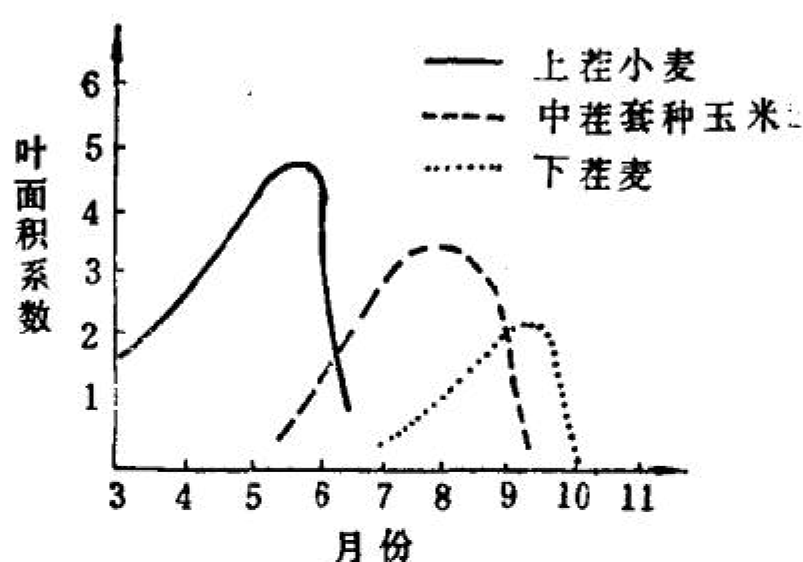


图2.17 粮食三茬套种叶面积动态

（三）改善水、肥、热、气等外界条件，增加光合能力

$CO_2$在空气中的浓度，一般为320ppm，而$C_3$植物的光合作用$CO_2$饱和点，一般为这个数的4—5倍，所以仅靠大气中$CO_2$扩散，往往是不能满足需要的，要求作物层内有一定的湍流交换强度，让新鲜空气不断通过叶面以解决$CO_2$浓度的不足。增施有机肥料，它释放的$CO_2$也能提供光合积累的一部分需要。当前在大田条件下，采取加强$CO_2$湍流扩散或增施$CO_2$肥料的经济有效方法还有待研究。但在保护地栽培条件下却可以解决。例如在温室中栽培作物，用人为措施增加温室中$CO_2$含量，已有提高产量40%

的记录。

足够的水分也是加强光合作用所必需的。叶片缺水，气孔开度减小，甚至关闭，便影响$CO_2$的吸收，蒸腾减弱，叶温增高，从而增加呼吸消耗，降低了净光合生产率。

温度过高或过低，对光合作用影响是很显著的。许多改善作物群体水、热状况的措施，实际上也改善了群体利用光能的状况。

（四）减少呼吸消耗，增加净光合生产率

光呼吸型作物，光呼吸放出的$CO_2$比暗呼吸大3—4倍，占光合作用同化$CO_2$量的三分之一以上，因此，抑制光呼吸就能减少$CO_2$的释放，大大提高光合强度，增加干物质积累。控制光呼吸作用，可以通过培育光呼吸作用低的品种；也可从光呼吸型作物（如稻、麦）中选择光呼吸低的植株进行筛选培育；还可以通过化学方法来抑制光呼吸。

另外，防止病虫等危害，也是减少光合产物消耗的重要措施。

（五）提高经济系数

禾谷类作物经济系数大多为0.3—0.4，高的可达0.5，例如玉米、高粱约0.3，水稻、小麦为0.35—0.5，甘薯可达0.7以上。通过育种和先进栽培措施，经济系数可以提高。水稻矮杆品种的经济系数就从以前的0.35提高到0.5或以上。但不良气象条件如干旱、低温等，往往可使经济系数降低，其减产程度常常大于生物学产量降低的程度。

从上述五个方面来看，农作物产量实际等于：〔(光合面积×光合能力×光合时间)－消耗〕×经济系数，可称之为光合性能。它是决定农作物产量高低和光能利用率大小的关键。一切增产措施，归根到底，主要通过改善光合性能而起作用。它们也是互相联系，互相影响的。

总之，光是植物生产有机物的能源，农、林、牧业生产的各种产品都是太阳潜能的表现形态。目前，植物的光能利用率还很低，若植物在生长期内总干物质的平均光能利用率能达到5％，

则亩产可以达到3200－4000斤，因而，设法提高植物的光能利用率，可以发挥农业生产的极大增产潜力。

## 参 考 文 献

〔1〕北京农业大学农业气象专业编，农业气象学，科学出版社，(1982)。
〔2〕翁笃鸣等编著，小气候和农田小气候，农业出版社，(1981)。
〔3〕邱国雄，光合有效辐射，植物生理学通讯，NO.5，(1981)。
〔4〕牛文元编著，农业自然条件分析，农业出版社，(1981)。
〔5〕H.A.叶菲莫娃，植被产量的辐射因子（王炳忠译），气象出版社，(1983)。
〔6〕祝宗岭，近似昼夜节奏——生物钟，植物生理学通讯，NO.1，(1981)。
〔7〕唐锡华等，植物生理学报，6(1)，(1980)。
〔8〕B.S.Vergara，作物生产的光周期效应，作物气象生态译丛，（5），农业出版社，(1984)。
〔9〕玖村敦彦，环境变化对植物的影响，农业气候资源与作物生态，中国科学院自然资源综合考察委员会，(1982)。
〔10〕黄策等，水稻群体物质生产过程的计算机模拟，作物学报，12(1)，(1986)。
〔11〕Hayak，S.K.等，光强和光质对水稻光合效率的影响，光合作用与作物生产译丛（3），农业出版社，(1981)。
〔12〕李清田，光强与苹果质量产量的关系，农业气象，3(1)，(1982)。
〔13〕云南大学生物系编，植物生态学，人民教育出版社，(1980)。
〔14〕村田吉男，太阳光能利用率和光合作用，农业气候资源译丛，农业出版社，(1981)。
〔15〕J.Seemam等，农业气象学（亓来福等译），气象出版社，(1984)。
〔16〕J.L.蒙蒂思主编，植被与大气——原理（卢其尧等译），农业出版社，(1985)。
〔17〕户苅义次主编，作物的光合作用与物质生产（薛德榕译），科学出版社，(1979)。
〔18〕水稻光温生态研究协作组编著，中国水稻品种的光温生态，科学出版社，(1978)。

# 第三章 热量条件与农业生产

热量是农业环境的重要因子，是生物体生活的重要条件。热量条件对农业生产的影响，是通过其强度、持续时间和变化规律等方面产生的。农业生产对象的生命活动只能在它们所需要的热量条件范围内进行，过高或过低，都会使生命活动受到抑制、甚至死亡。

## §1 温度的农业意义及温度指数的概念

### 一、温度表示热量的物理学基础

在研究热量条件与生物生长发育的关系时，一般都用温度这个物理量表示。首先，根据热力学原理，热量是传递着的能量，温度是决定一个系统是否与其它系统处于热平衡的客观标志，其特征在于一切互为热平衡的系统都具有相同的温度，亦即温度是系统本身内部热运动状态的特征反映。因此，温度的高低可反映热量的水平，而温度的概念也为热量的测量和用温标表示提供了可能。其次，在反映地方气候条件时，用温度比用热量具有更大的优越性，因为温度既决定于辐射热的大小，还决定于下垫面的条件及其它的物理和非物理特征，它是一个受综合影响的度量指标。第三，植物生化反应的速率与温度的关系比用“焦耳”表示的热量的关系更为密切。因为生化反应速率主要决定于活化分子的数目（浓度），而不是决定于反应物质的平均动能的变化。活化分子数目的变化则主要依赖于温度的高低。第四，和表示热量的其他物理量相比，温度量的测量方法最为简单、仪器普通、易于普及等，为用温度表示热量提供了方便。

## 二、温度的农业意义

温度作为热量条件的标志，对生物体的影响是多方面的，它影响其生理生态特性、分布、同化、呼吸及其蒸腾等各生理过程、生长发育与产量形成以及产品的产量与质量，等等。

根据温度对作物生理生态特性的影响及作物对温度的要求，可把作物分为喜温作物和耐寒作物，前者指生长发育的起点温度与全生育期中所要求的温度都比较高，如水稻、玉米、棉花、高粱、烟草、花生、甘蔗等；后者则指生长发育的起点温度与全生育期中所要求的温度相对较低，如麦类、油菜等。根据温度对植物分布的影响及植物对温度的适应性，也可把植物分成广温植物（植物生长要求的温度范围较宽，分布较广）和窄温植物（植物的生活对温度条件要求严格，分布范围也较窄）（图3.1）。

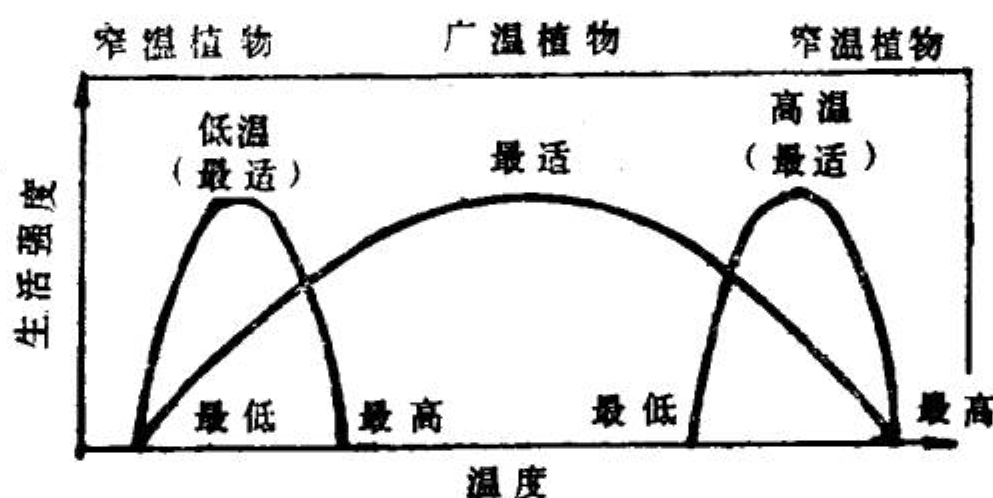



图3.1　植物生活强度与温度

温度除直接影响作物的生长发育外，还通过影响农业环境中的其它因子（如水分、土壤等），间接地影响作物的生育。温度条件还是作物病虫发生、发展以至蔓延的基本条件之一。

从温度的物理学意义出发，系统本身是决定温度水平高低的条件之一，因此，土壤温度、动植物体温及水温在研究温度对农业生物的影响及其间关系时有着特殊的意义。

（一）土壤温度的农业意义

土壤温度对于在土壤中以及在邻近气层中所出现的各种过程

和现象都产生影响，自然也影响到农业生物的生长发育环境及其生命活动。地温对作物整个生育期都有一定影响，而且前期影响大于气温。在气温低而又不致危害作物正常生育的情况下，增加地温对促进作物生长是十分有利的。地温对作物的影响包括对作物地上部和根系的生长量、种子的萌发与幼苗的生长、作物的安全越冬、作物光合作用、作物对水分及营养物质的吸收与输送以及土壤中有效养分的变化等等的影响。

土壤温度不太高时，对根系生长比较有利。如燕麦在土温6—8℃时生长的根占整个植株的21%，土温为12—14℃时生长的根仅占14%。再如，当土壤温度为20℃时，棉花植株的根占整个植物体干重的6%，而当温度为35℃时，根只占3.5%。在5—27℃范围内，玉米根系对磷的吸收量随温度的升高而增加，但以10℃时最好。

种子发芽、出苗以及幼苗的生长与土壤温度的关系最为密切。在水分供应充足且在一定的温度范围内，种子发芽的速度随土壤温度增高而加快。种子发芽要求一定的温度，表3.1为几种主要作物种子发芽的土壤最低、最适与最高温度。还须指出，虽然在种子发芽最适温度范围内，种子发芽最快、出苗率最高，但有时发芽最快的温度却可能不是出苗最多的温度，且幼苗也不一定健壮。

**表3.1　种子发芽所需的土壤温度条件**

| 作　　物 | 土壤温度（℃） | | |
|---|---|---|---|
| | 最　低 | 最　适 | 最　高 |
| 小麦、黑麦、大麦 | 1—2 | 20—25 | 28—32 |
| 粟、玉米 | 8—10 | 25—30 | 40—44 |
| 水稻 | 12—14 | 30—32 | 36—38 |

土温对植物块根、块茎及其它作物产量影响很大。据中川的研究，甘薯产量与6、7、8月20厘米地温平均值之间存在线性

关系。同时，土温不仅影响到产量，还会影响到马铃薯的退化及在土壤中的分布。西内光认为植物体内物质运输有从高温处向低温处转移的趋势，所以光合作用产物如糖类和其他可溶性物质容易向低温层次聚集，因而甘薯最多的深度是地面以下5—25厘米的土层，30厘米以下则较小，10—15厘米深度块根膨大得早而快。小野等通过对花生结实与结实层地温关系的分析（图3.2），得出结实的最低临界地温、最适地温和最高临界地温分别是15—17℃、31—33℃、37—39℃，温度过高或过低都会造成子房托组织的坏死，易腐烂。据研究，在15.6—27.4℃之间，美国衣阿华州（Iowa）的玉米产量几乎随10.2厘米深处土温呈线性关系，土温高于27.4℃，产量降低。

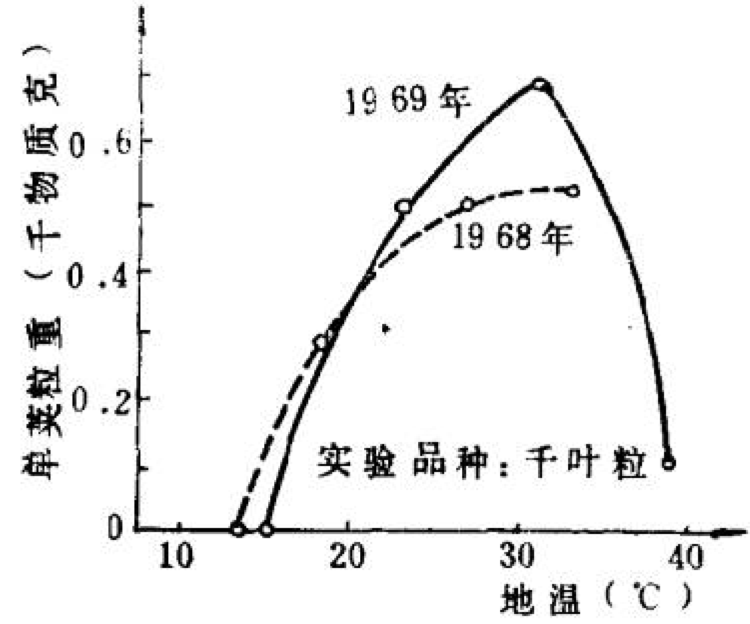


图3.2 花生结实层的地温与单荚粒重的关系

在土壤水分充足的条件下，土壤上层分蘖节处的温度是影响分蘖强度的主要因素。当气温下降而土温保持不变时，分蘖动态与土壤上层的最高温度相适应，而与气温无关。分蘖强度随土壤上层温度的升高而增强。分蘖节处的温度还是影响作物越冬的最主要因素，据新疆乌拉乌苏农业气象试验站的研究，冬季麦苗冻害死亡率与低温强度（分蘖节处最低温度）呈反“S”型曲线关系。

此外，土壤温度还影响根的吸水量（表3.2为克拉马（Kramer）的试验结果）、农田$CO_2$释放量（表3.3为杜宝华等人1985年的试验结果）以及通过影响作物吸水而影响气孔阻力和限制作物的光合作用。廖宗族（1982）还论证了雅鲁藏布江流域地温与春麦种植上限高度的关系，认为用地温作为热量标准能解释该区

表3.2 土壤温度与根系吸水量的关系

| 土壤温度(℃) | 0 | 9.5 | 23.8 | 35.0 | 43.0 |
|---|---|---|---|---|---|
| 吸水量(mm) | 27.9 | 38.3 | 49.0 | 59.8 | 66.5 |

表3.3 冬小麦田间土壤$CO_2$释放量日平均值

| 生育期(月/日) \ 项目 | $\overline{D}$*(克/米$^2$·小时) | $\overline{T}$（℃） |
|---|---|---|
| 拔节(4/21—23) | 15.36 | |
| 孕穗(5/6—8) | 21.76 | 25.9 |
| 扬花(5/17—20) | 11.40 | 23.7 |
| 灌浆(5/30—6/1) | 23.20 | 34.0 |
| 乳熟(6/6—7) | 2.88 | 30.6 |

* $\overline{D}$为土壤$CO_2$释放量。$\overline{T}$为发育期间10厘米平均地温。

海拔4460—4750米的春麦生长优于用气温。可以肯定，在土壤一植物一大气系统的研究中，土壤温度的重要性会越来越引起人们的注意和深入的研究。

在同一时间同一地点，土壤温度与空气温度虽然不同，但许多资料证实，土壤热状况和邻近气层的热状况有直接的依赖关系。日本荒川和东等人（1965）研究了日本谷地1米深度的土壤年平均温度（$T_s$）与年平均气温（$T_a$）的关系，得出

$$T_s = 3.4 + 0.89T_a \quad (3.1)$$

基于地温与海拔、纬度、日照百分率、空气湿度等因子有关，廖宗族提出估计月平均地温的多元线性回归模式。

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 \quad (3.2)$$

式中，$x_1$为拔海高度（百米），$x_2$为纬度，$x_3$为日照百分率，$x_4$为湿润程度（等于$\frac{降水量}{可能蒸发量}$×空气相对湿度），y为月平均地温估计值（0—20cm地温平均值）。并对雅鲁藏布江流域1—12月平均地温进行了拟合，效果较好。同样，对于日平均地温，也

可依据其对于气温（或其他气候因子）的关系，建立其估计式。影响土壤温度数值及其变化规律的因子是多方面的，上述的关系式局限性很大，应依据具体试验资料作具体分析。

（二）水田水温的农业意义

水稻及其它水生植物的生长发育与水田温度有密切关系。就水稻而言，水温的高低影响到稻谷的发芽速度、发芽率、发育性状、养分吸收、光合作用以至产量形成。稻谷的萌发要求充足的水分，同时还需具有适宜的温度条件，如果提高水温，则稻谷达到饱和吸水量所需要的时间缩短，发芽迅速（表3.4）。用不同水源进行灌溉，水温往往不同。水温的高低影响到稻株的光合作用，苏联耶雷琴的试验表明，稻株在水温为27—32℃时光合作用强度最大（表3.5）。日本长尾的试验也论证了这一点，而且稻

**表3.4 不同水温下稻谷发芽的吸水速度**

| 水温(℃) | 达到饱和吸水量所需时间（小时） | 备　注 |
| --- | --- | --- |
| 10 | 90 | 粳　稻 |
| 20 | 72 | |
| 25 | 48 | 籼　稻 |
| 30 | 40 | |
| 35 | 30—40 | 90%出芽 |

**表3.5 水温对稻株光合作用的影响***

| 观测时间 | 温度(℃) | | | | |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| | 17—20 | 22—25 | 27—32 | 32—36 | 35—41 |
| 8月9日 | 3.91 | 7.35 | 8.91 | 8.36 | — |
| 8月9日 | 3.39 | 5.73 | 6.36 | 5.51 | 3.91 |
| 8月21日 | 0.67 | 1.01 | 1.02 | — | 0.06 |
| 8月21日 | 1.15 | 1.30 | 1.33 | — | 0.03 |
| 8月23日 | 1.18 | 1.32 | 1.63 | 1.40 | — |
| 8月23日 | 1.24 | 1.75 | 1.04 | 0.49 | — |

* 表中所列数字为1克干物质在1小时内放出的氧气（厘米$^3$）。

株光合作用的降低还与水稻品种有关。水温不同，水稻吸收养分的情况差异很大（图3.3）。这是因为不同的水温影响了稻株生理活性所致。另外，水稻不同生育时期对水温的要求不同。表3.6说明了适宜于水稻生长发育和产量形成的水温范围及其最适温度值。当平均水温低于25℃时，出穗会明显延迟，每下降1℃大致要延迟1天。早春为了提高水温，常采用迂回水道，让水在运转过程中多接受太阳辐射，待温度提高后再灌入水田中。冬春季节地下水温一般比地表水高，引入农田可用以防御低温危害。

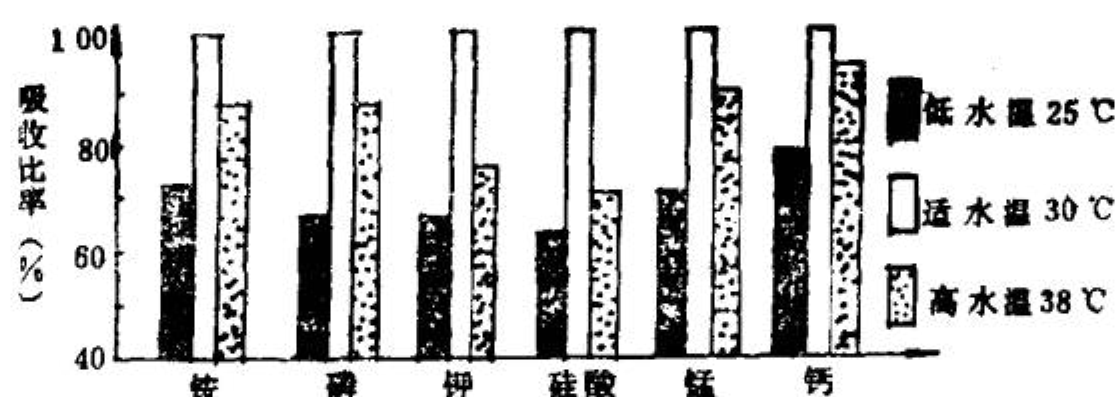



图3.3　不同水温对水稻养分吸收的影响

水温还对鱼类等生物产生影响。我国多饲养温水性鱼类，这类鱼生活在15—30℃的水域内，最适水温为25℃左右，超过30℃或低于15℃都不利于其生长，造成食欲减退、代谢减慢、产量下降。据研究，在相同的两个鱼池中饲养鲤鱼，生长在平均水温为22℃的水域里的产量比平均水温为10℃的产量高3倍。各种鱼类对水温的要求如表3.7所示。鱼产卵及鱼苗孵化要求的水温更加严格，在其最适温度范围之外，鱼类虽能生长，但却不能生殖。

水田温度与气温及地温有一定的关系。表3.8是日本东山农业试验场分场（1945）在水稻分蘖期观测的日较差最大的位置随生长而向高处发展的情况，可以看出水田温度与土壤温度及空气温度的一般关系。

（三）生物体体温的农业意义

生物体体温与其周围环境温度并不一致，体温才是真正影响

**表3.6 水稻的生长发育和水温条件（℃）**

| 水温 \ 生长期 | 初期生长 | 分蘖 | 出穗 | 结实 |
|---|---|---|---|---|
| 最高 | 35—40 | 35 | 35—40 | 35 |
| 适宜 | 30 | 20—30 | 25—30 | 25—30 |
| 最低 | 13—15 | 15—20 | 15—20 | 20 |

**表3.7 各种鱼类对水温的要求**

| 鱼种 | 产卵温度(℃) | 最适生长温度(℃) | 生长上限温度(℃) | 生长下限温度(℃) |
|---|---|---|---|---|
| 鲢鱼 | 20左右 | 24—28 | 37 | 17 |
| 鳙鱼 | 20—27 | 24—28 | | |
| 草鱼 | 20左右 | 24—28 | 30 | |
| 青鱼 | | 24—28 | | |
| 鲤鱼 | 17以上 | 25—28 | 29 | 13 |
| 鲫鱼 | 15以上 | | | |
| 罗非鱼 | 23—33 | 20—35 | 45 | 10 |
| 甲鱼 | 23—30 | 25—32 | | 10—12 |

**表3.8 日较差最大的位置随生长情况的温度而变化（℃）**

| 位置（距地面） \ 月/日 | | 7/5—6 | 7/24—25 | 8/24—25 | 9/20—21 |
|---|---|---|---|---|---|
| 气温 | 100cm | 9.9 | 12.9 | 11.6 | 14.1 |
| | 50cm | 10.9 | 14.8 | 15.2 | 15.0 |
| | 20cm | 12.4 | 16.9 | 12.2 | 13.1 |
| 水温 | | 12.9 | 15.9 | 10.3 | / |
| 土温 | 2 cm | 12.4 | 11.4 | 5.7 | 6.2 |
| | 5 cm | 8.4 | 8.9 | 4.3 | 5.7 |
| | 15cm | 2.3 | 2.4 | 1.4 | 1.8 |

生物体生命活动的。作物的一切生理活动除受环境温度条件影响外，还决定于植株本身的热量收支、热传导和蒸腾作用等。而叶温与作物的光合、呼吸、蒸腾及极端温度对作物的危害等都有直接关系，因而用叶温表示作物的温度状况更为客观；由于生态习性及生理机能的影响，禽、畜体温往往与环境气温有较大的差异，因而禽、畜体温的高低多用以判断其生理活动情况与疾病的发生。

植物的光合作用及其他生理过程受叶温的影响很大。津野、藤濑（1965）对甘薯各个生育时期光合作用与叶温的关系进行了研究，如图3.4所示。

作物根系温度对其生长发育及产量形成也有很大影响。布朗维（Bronwer，1963）用玉米、红菜豆和豌豆在5℃和40℃之间保持间隔5℃的八个根系处理进行试验，结果如图3.5所示。可知，净同化率对根温的反应曲线形状在植物种间是不同的，根系温度对同化率的影响在高、低温附近较大。

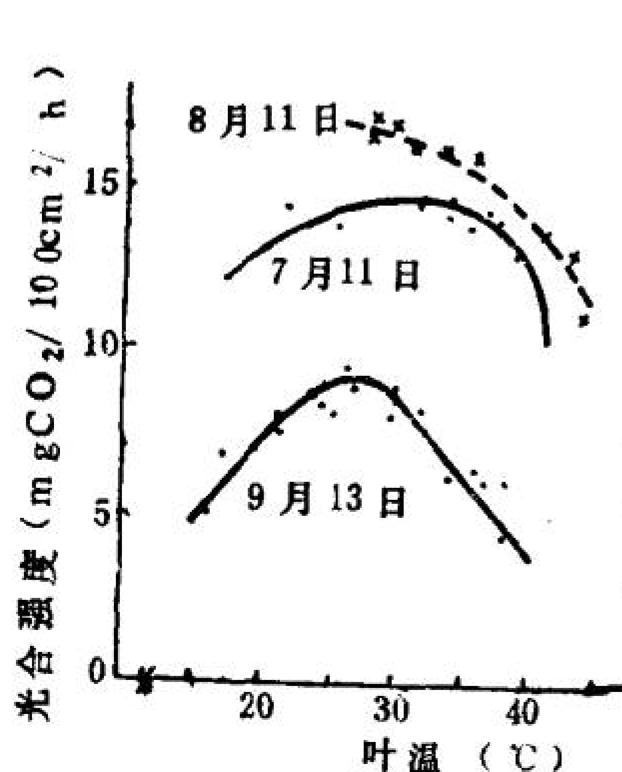



图3.4 甘薯各生育时期光合作用与叶温

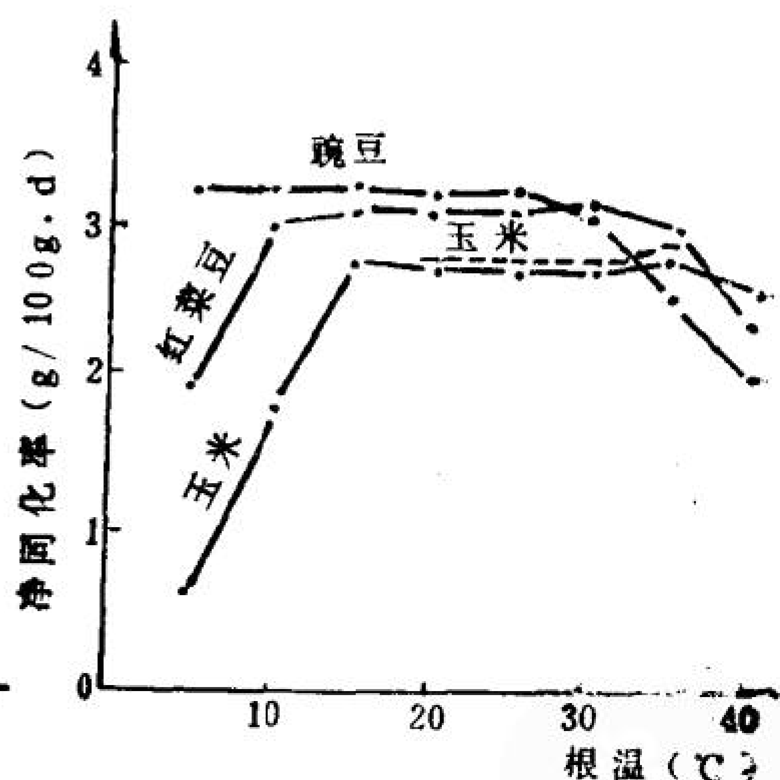



图3.5 根温对净同化率的影响

由于受观测手段、应用范围等的限制，目前对叶温等的研究尚不深入，但作物体温与作物的关系正日益受到重视。美国近年来已利用卫星测定植株体温，并进行作物生育状况的分析，结合

气象资料，预测农作物产量和柑桔冻害，测定小麦体温以推算作物缺水程度及预报麦田灌溉等。

实际观测表明，在有太阳直接辐射的情况下，叶温常高于气温3—5℃，有时甚至高达10℃以上，阴天或阴蔽时，叶温与气温接近，雨后新晴，由于叶面蒸发耗热，叶温常低于气温。夜间叶温低于气温。在阳光充足、农田水分供应良好的情况下，植物叶温与气温差值有可能等于零，此时称为叶片的“相同点温度”(Equivalence point Temperature)。K.T.帕乌(Pawu)(1984)曾导出了一个计算该温度($T_{eg}$)的方程式如下：

$$T_{eg}=T_e=T_a$$

$$=\left[R_l-\frac{\rho C_p}{r}\times\frac{\delta_e}{(r_a+r_s)}\right]^{\frac{1}{4}}\left[\frac{1}{\varepsilon\sigma}\right]^{\frac{1}{4}} \qquad (3.3)$$

式中，$T_e$、$T_a$分别为叶面和空气温度，$R_l$为叶片每面净吸收辐射，$\rho$为空气密度，$C_p$为空气比热，r为干湿球常数，$\delta_e$为水汽压亏损（等于饱和水汽压减去实际水汽压），$r_a$为水汽流动的空气动力学阻力，$r_s$为叶面阻力，$\varepsilon$为叶片比辐射率，$\sigma$为斯蒂芬-玻尔兹曼常数。方程式表明，理论上的叶片相同点温度，与叶片吸收的太阳能、水汽压亏缺、影响水汽压输送的表面及空气动力学阻力大小、叶片比辐射率(Emissivity)等因子有关。

影响叶温（叶—气温差）的因子主要有植株本身状况及外界环境条件，包括叶片状况、作物种类、空气温度、湿度、太阳辐射、风速以及土壤水分状况等。在太阳高度角大时，直立叶温度低于水平叶，遮荫时相反，有云时差值较小（图3.6）。在湿度不变时，叶—气温差随温度上升

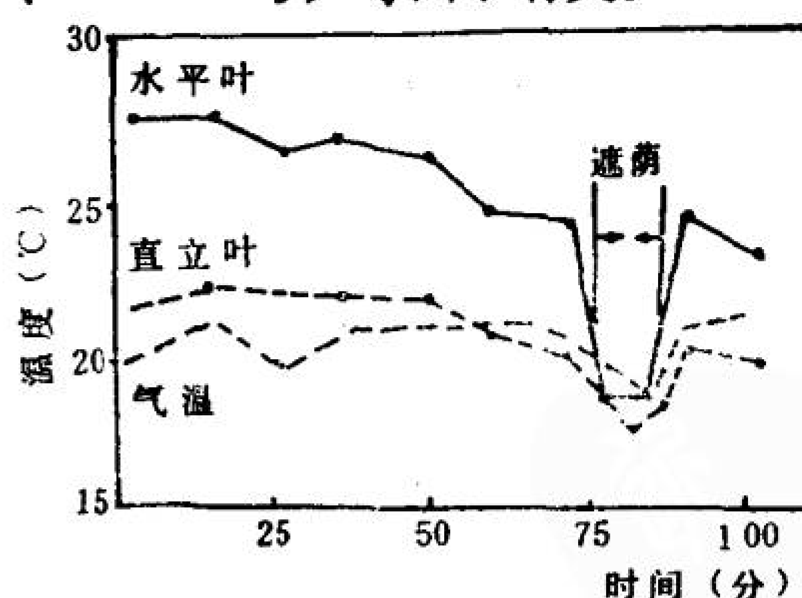


图3.6 苹果叶温与气温比较

而近似线性地减少，直到气温超过叶温，叶一气温差呈负值时为止。湿度对叶温的影响很复杂，它主要通过调节气孔开关、叶片蒸腾而产生影响。当气孔孔径的变化仅与短波辐射及气温有关而与湿度无关时，如空气湿度增加，则叶温线性地上升。而在湿度低时，也会使气孔自动闭合使叶温升高（长谷场撤也等，1984）。武智等（1962）曾用蜜柑叶试验研究叶一气温差随日射及风速的关系（图3.7）。如果风速不变，随日射的增加，叶一气温差按

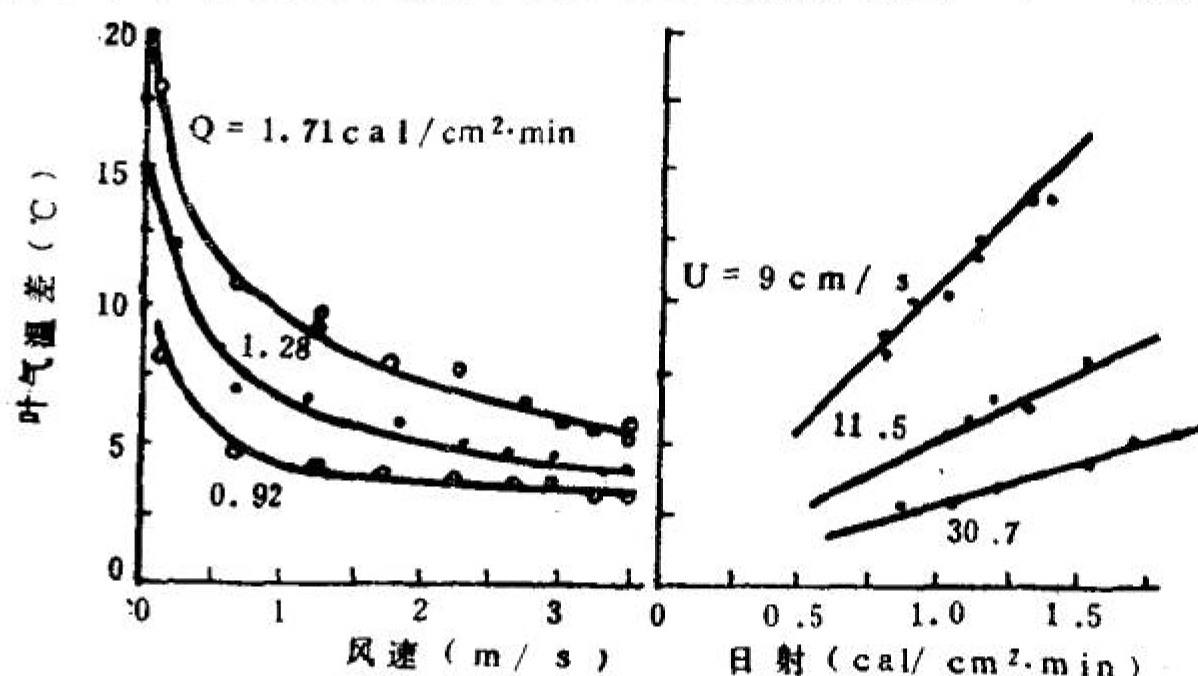



图3.7 蜜柑叶一气温差因日射和风速而出现的变化

比例增大，比例系数随风速而减小；若日射不变，叶一气温差随风速的增大而减少。灌溉可通过调节植物蒸腾而影响叶温。加德勒（Gardner，1981）等曾通过不同灌溉条件下玉米植株温度和叶一气温差的研究，确定了植株水分的一个共同指标。他指出在阳光照耀下，水分不亏损的和中度亏损的中午时叶温常低于气温1～2℃，水分严重亏损的植株叶温要高于气温4.6℃之多。长谷川（1977）研究了叶一气温差与植物种类的关系，指出$C_3$植物不论空气干湿均比$C_4$植物蒸腾率大而叶温偏低，且叶一气温差随太阳辐射强度而变化。在大陆性和海洋性气候条件下，对植株的蒸腾作用产生不同效果，亦使叶一气温间的关系发生变化。此外，植株的叶片方位、部位等都有影响。这种复杂的关系尚待进一步研究。

实际工作中，尽管可用热电偶或红外辐射测温仪直接读取叶温，但至今器测法尚难以推广应用。采用间接计算法以获得不同时段、不同地理区域中叶温的资料也为人们研究的重点。Φ.A.摩明诺夫、长谷川（1978）等曾寻求建立用器测法测得的实际叶温与同高度干湿球温度之间的回归方程，蒙蒂斯（J.L.Monteith，1975）曾根据温度廓线相似原理，用气温资料推算叶温，布德科（М.И.Будыко，1958）提出用热量平衡方程推算叶温为后来的研究打下了基础。

内岛善兵卫（1974）按照叶子具有平面式双面气孔（即单面蒸腾或双面蒸腾）的差别，从叶片热量平衡出发，推出了叶温计算式：

$$\left.\begin{aligned} T_{\ell} - T_{a} &= \frac{S_{\ell} + 2l\rho a D_{eff} d}{2(l\rho a D_{eff}\varphi + C_{p}\rho D_{\ell})} \quad \text{两面气孔} \\ T_{\ell} - T_{a} &= \frac{S_{\ell} - l\rho a D_{eff} d}{l\rho a D_{eff}\varphi + 2C_{p}\rho D_{\ell}} \quad \text{单面气孔} \end{aligned}\right\} \tag{3.4}$$

式中，$T_{\ell}$、$T_{a}$分别为叶温和气温（℃），$S_{\ell}$为叶片净辐射量〔$=(1-a_{\ell})(1+a_{s})(Q+q)+F_{1}+F_{2}-2u_{\ell}$〕，$a_{\ell}$和$a_{s}$分别为叶面和地面的反射率，$Q+q$为全短波辐射，$F_1$和$F_2$分别为大气辐射和地面辐射，$u_{\ell}$为叶面热辐射，$l$为蒸发潜热，$\rho$为空气密度，$C_p$为空气定压比热，$D_{eff}=D_{\ell}D_{s}/(D_{\ell}+D_{s})$为有效扩散速度（cm/s），$D_{\ell}$为叶面扩散速度（cm/s），$D_{s}$为叶孔扩散速度（cm/s），$a=0.622/p$，$p$为大气压（$=760$mmHg[1]），d为饱和差（mmHg），$\varphi$为饱和水汽压—温度曲线斜率。由上两式可见，叶—气温差与$S_{\ell}$成正比；与$D_{\ell}$（即与风速）成正比；白天，饱和差增加，叶—气温差减少；随气温上升（$\varphi$增大），叶—气温差减小；在其他条件不变时，单面气孔叶温较高；随有效扩散速度$D_{eff}$减小（即气孔开度减小），叶—气温差增大。

1）1mmHg=133.322Pa

中国科学院卫林等（1981）在前人研究的基础上，根据热量平衡原理，并结合空气动力学方法，给出了叶温计算的新方法：

$$T_f = T_a + \frac{\mu Q - LE}{\frac{2\rho C_p}{r_a} + 8\varepsilon\sigma T^3} \qquad (3.5)$$

式中，$T_f$、$T_a$以及$\rho$、$C_p$含义同上，$\mu=1-$反射率$-$透射率（$=0.50$）为视表面层作物叶片的平均短波辐射吸收系数，Q为投射到视表面层的日射通量，LE为作物叶面的潜热通量，$r_a$为叶面边界层阻抗（$=KD^{\frac{1}{2}}u^{-\frac{1}{2}}$）。D为叶片长度（cm），u为叶面附近的风速(cm/s)，K为比例系数，对稻麦类作物$K=2.09$秒$^{\frac{1}{2}}$/厘米，$\varepsilon$为叶面比辐射率($=0.9$)，$\sigma$为斯蒂芬-玻尔兹曼常数，T为用K表示的气温值。据用稻、麦田中试验资料比较，效果较好。

### 三、温度指数及其农业意义

如上所述，温度对于农业生产有着很大影响，并被作为研究农业生物生长发育及产量形成的重要度量。同时，人们还依据所研究的农业生产对象的具体特点，提出了一系列更适宜标志农业生物生长发育的热量状况及相互关系的温度的标示形式，即温度指数，有时也称为温热指数或热量指数。如积温（即度日、度天或度时）即为温度指数的最常用形式。此外，还有其它一些温度指数的表示形式，例如：

（1）大豆发育单位与大豆温度效率单位

布朗（D.M.Brown）等依据大豆在结荚数达到高峰之前，其发育与温度的关系较为密切的事实，提出一种称为大豆发育单位（S.D.U）的指标，其方程式为：

$$S.D.U = 4.95T - 0.0829T^2 - 40.91 \qquad (3.6)$$

式中，T代表日平均气温（℃）。利用该指标，可以较好地描述大豆生长发育过程中所要求的温度条件及分析大豆的适种范围。叶修祺等（1983）在此基础上，利用近5年的田间试验资料。在

确定不同气温对大豆发育的效率（14℃以下的日平均气温对大豆发育无效，15—19℃低效，24℃效率最高，34℃以上的高温无效）之后，提出大豆的温度效率单位（T.R.U），其计算式为：

$$T.R.U = -165.9 + 16.218T - 0.335T^2 \qquad (3.7)$$

式中，T为日平均气温（℃），据验证，效果很好。

（2）玉米热量单位

D.M.布朗针对玉米发育与气温的关系，提出玉米热量单位（C.H.U）的概念，有时也称为“安大略省法”或“加拿大热量单位”。它是从玉米生长季节里每日最高气温（$T_M$）和最低气温（$T_m$）之和推导出来的一个指标。逐日最高气温与玉米的生长发育呈非线性关系，其最适温度为30℃，玉米植株的致死温度为50℃，10℃为最高温度的下限，最低温度与玉米的生长发育为线性关系，其下限温度为4.4℃，玉米开始生长和维持生长所需要的日平均气温为12.8℃。逐日玉米热量单位的计算式为：

$$C.H.U = \frac{9/5(T_m - 4.4) + 3.33(T_M - 10) - 0.084(T_M - 10)^2}{2} \qquad (3.8)$$

将逐日C.H.U累加起来，即为累积热量单位，可用作玉米生长发育状况和成熟度分析以及成熟期预报和玉米适宜种植区分析等。

克兰（P.L.Crane）等人曾根据1971—1973年12个玉米杂交种在13个地点的试验结果，用不同的热量指标进行计算，结果以C.H.U为最好。中国农业科学院冯玉香等人的研究也证明了它是一个比较稳定的指标。

（3）其它

除上述以外，在日本还将5℃以上的温度累积值［$\Sigma(t-5)$，$t \geqslant 5$。其意义为后文所讲的有效积温］称为温度指数，5℃以下的温度累积值（$\Sigma(5-t)$，$t \leqslant 5$）称为寒冷指数。桑斯威特在研究可能蒸散问题时，引入月热指数（i）和年热指数（I）的概念：

$$
\left.\begin{aligned}
i &= \left(\frac{t}{5}\right)^{1.514} \\
I &= \sum_{i=1}^{12}\left(\frac{t_i}{5}\right)^{1.514}
\end{aligned}\right\} \tag{3.9}
$$

式中，t为月平均气温（℃）。

研究不同日较差及其累积值对作物的影响时，还可用干凉度（$C_k$,度·小时）表示天气干燥凉爽的程度，其计算式为：

$$C_k = T_0 \cdot L = \overline{T_0} \cdot n \cdot L \tag{3.10}$$

式中，$T_0$为某时段气温日较差的累积（℃），L为日照时数（小时），$\overline{T_0}$为期间平均日较差，n为时段长度（天）。在研究人类及家畜对环境条件尤其是温湿条件的适应问题时，常用温湿指数（THI）表示（DT表示为不舒适指数）。对人类及家畜的THI计算式为：

$$THI = 0.55T + 0.2T_d + 17.5 \tag{3.11}$$

式中，T和$T_d$分别为干球和露点温度（°F）。THI＝70作为不舒适的起始指数。

## §2 温度强度及其对农业生物的影响

### 一、农业生物生命活动的基本温度

#### （一）三基点温度与受害、致死温度

农业生物生命活动的每一个过程，都必须在一定的温度下才能进行，并有维持生命活动及适应生长与发育的温度范围。图3.8




图3.8 作物生命活动的基本温度（℃）示意图

为大多数作物生命活动的基本温度示意图。

不论对于哪种温度，仅就其生理过程来说，都有三个基本点，即通常所说的三基点温度：最低温度、最适温度和最高温度，或称为下限温度、最适温度和上限温度。对于作物的生长，下限温度是指在一定低温影响的一定时间内，作物不能继续生长，但也不受伤害；最适温度是指生长最适宜的温度；上限温度是指作物处于一定高温的一定时间内，不能继续生长但也不受伤害的温度。

不同作物三基点温度不同，并有一定的变化幅度。原产热带的作物，其生长适宜温度比原产温带的作物要高；冬作物（如小麦）的生长适宜温度比夏作物(如玉米)的要低。表 3.9 列出几种

**表3.9　几种主要作物生长的三基点温度**（℃）

| 作　物 | 最低温度 | 最适温度 | 最高温度 |
|---|---|---|---|
| 小　麦 | 3—4.5 | 20—22 | 30—32 |
| 大　麦 | 3—4.5 | 20 | 28—30 |
| 玉　米 | 8—10 | 30—32 | 40—44 |
| 水　稻 | 10—12 | 30—32 | 36—38 |
| 烟　草 | 13—14 | 28 | 35 |
| 甜　菜 | 4—5 | 25 | 28—30 |
| 棉　花 | 13—15 | 28 | 35 |
| 油　菜 | 4—5 | 20—25 | 30—32 |
| 牧　草 | 3—4 | 26 | 30 |
| 紫花苜蓿 | 1 | 30 | 37 |

主要作物生长的三基点温度。同一种作物在不同生育时期的三基点温度也不同，如从作物生长要求的最适温度来分析，作物早期要求的温度稍低，生长盛期要求较高，到成熟时期则又低一些。对同一种作物，不同品种的要求也有差异。茶树生长，其生物学最低温度（春季开始生长的温度），大多数品种在10℃左右，有的品种在10℃以上，有的则低于10℃；最适温度变化在19—30℃范围内；生物学最高温度（抑制茶树生长的温度）为30℃左右；产蛋母鸡要求的适宜舍温为7—25℃，以20℃最适于产蛋，低于

7 ℃或高于25℃，产蛋率就会下降，7 ℃，20℃，25℃可认为是蛋鸡产蛋的下限、最适与上限温度；鱼类属变温动物，其体温随环境温度的变化而变化，对大多数鱼类而言，最喜欢生活在20—30℃的温暖水里，水温高于30℃，或低于15℃它们不爱吃食，这些可认为是鱼类生长的最适、最高及最低温度。

就某一项生理过程而言，也有三基点温度。作物光合作用和呼吸作用就存在三基点温度（图 3.8）。一般地说，光合作用的最低温度为 0—5 ℃，最适温度为20—25℃，最高温度为40—50℃，对呼吸作用，则分别为 -10℃，36—40℃，50℃。不同作物及品种，作物的光合与呼吸作用的三基点温度也有变化，而且，光照强度、$CO_2$浓度、土壤水分含量以及农业技术措施等都会影响三基点温度值的大小。

尽管生物的三基点温度不同，不同作物之间又有差别，但仍有一些共同特征：最高温度、最低温度和最适温度指标都不是一个具体的数值，而是有一定的温度范围；无论对生存、生长，还是发育，最适温度基本上是同一个变幅范围，彼此差异很小，很明显，各种生命过程都是长期在类似条件下适应的结果，最适温度应对任何过程皆适宜；不同生物体之间最低温度的最低点差异很大，比如，耐寒作物可以忍受 -10— -20℃的低温，喜温作物却不能忍受 0 ℃的低温，最低温度与最适温度之间差距较大；各种作物的最高温度差异较小，也与最适温度比较接近。因此，低温危害比高温危害更为常见，对农业生产的影响也更大。

如果温度高于上限温度或低于下限温度，作物就会逐渐受到不同程度的危害，此时称为受害高温或受害低温。温度进一步升高或降低，则会使作物受害致死，称为致死高温或致死低温。结合上面所讲的三基点温度，这就是通常所说的五基点或七基点温度。

（二）有效温度与温度的有效性

从农业生物存在三基点温度的事实出发，就产生有效温度与

无效温度的概念。农业气象学通常把生物生命活动或生长、发育的下限温度称为各自相应的生物学下限温度（或生物学零度，并以B表示）。当日平均气温在B值以上（或以下）时，则该温度就是有效（或无效）的，故可以认为低于B值的日平均温度为无效温度；当日平均温度在B值以上，则该温度为活动温度，活动温度中扣除B值以下、上限温度（C值）以上的温度而余下的温度为有效温度。

尽管高于B值的日平均温度为活动温度（部分有效），有效温度应全部有效，但事实上，不同温度时，同样1℃对于生物体生长发育的影响（即效益）是不同的，有时还有较大差别，这就是温度有效性的问题。上节中所介绍的大豆发育单位或大豆温度效率单位，正是基于上述事实提出的。需要指出，目前在家畜气候或家畜环境的研究中也常用有效（环境）温度的概念，其意义与上述有不同。

（三）界限温度的农业意义

农作物生命活动的另一个基本温度是农业界限温度，又叫指标温度。它表明某些重要物候现象或农事活动开始、终止的温度。所谓“界限”，完全是从农业生产和气象条件的关系上划定的。农业气象上常用的界限温度（日平均温度稳定通过日期）及其农业意义为：

0℃：土壤冻结和解冻，越冬作物秋季停止生长，春季开始生长。春季0℃至秋季0℃之间的时段即为“农耕期”。低于0℃的时段为“休闲期”或“死冬”。

3—5℃：早春作物播种、喜凉作物开始生长、多数树木开始生长。春季3℃（5℃）至秋季3℃（5℃）之间的时段为冬作物或早春作物的生长期（生长季）。

10℃：春季喜温作物开始播种与生长，喜凉作物开始迅速生长，秋季水稻开始停止灌浆，棉花品质与产量开始受到影响。开始大于10℃至开始小于10℃之间的时段为喜温作物的生长期。

15℃：初日为水稻适宜移栽期，棉苗开始生长期，终日为冬小麦适宜播种日期，水稻内含物的制造和转化受到一定阻碍。初终日之间的时段为喜温作物的活跃生长期。

20℃：初日为热带作物开始生长时期，水稻分蘖迅速增长，终日对水稻抽穗开花开始有影响，往往导致空壳，初终日之间的时段为热带作物的生长期，也是双季稻的生长季节。

**二、温度与农业生物的生长发育**

农业生物的生长或有机体物质积累是在连续的、同时进行的两个相反过程——同化与异化过程中形成的。温度对于每个过程的影响虽不相同，但也有一些共同的特征。一般认为，在一定的温度范围内，温度对主要生命过程的影响基本上服从范霍夫(Vant-Hoff)定律，即温度每升高10℃，反应速率增加一倍：

$$Q_{10} = \frac{K_{T+10}}{K_T} = 2 \tag{3.12}$$

式中，$K_T$和$K_{T+10}$分别为温度为T和T＋10时的化学反应速率，$Q_{10}$为温度增高10℃后与原温度下化学反应速率之比值，称为温度系数。

实际上，上述定律应用于农作物的生长发育，只在一定的温度范围内有效。随着温度的升高，作物的生命过程最初是加快的，当温度超出一定界限时，光合作用和呼吸作用强度就减弱下来，而在温度进一步升高时，两种作用就完全停止。这就是光合作用与呼吸作用具有温度三基点的问题。

伦德加（Lundegardh，1954）曾研究温度对于马铃薯等光合作用与呼吸作用的影响，绘制了“光合作用一温度曲线”和“呼吸作用一温度曲线”（图3.9，3.10）。从图可以看出，在光合作用一温度曲线中，三条曲线上的数值虽不尽同，但基本趋势完全一致。两图曲线的变化趋势近似，但呼吸作用的最适温度比光合作用的为高。

温度对光合、呼吸作用的不同影响，这可从光合作用（P）

与呼吸作用（R）之比（P/R）与温度的关系中看出，它表征干物质生产效能与温度的关系。研究表明，在高温阶段(>35℃)，随温度升高，P/R值降低（图3.11）。

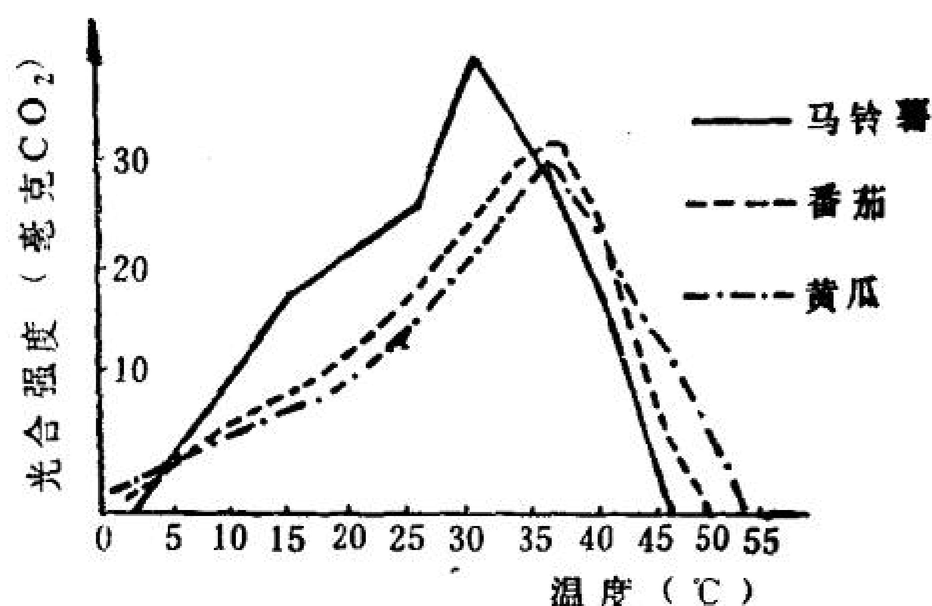



图3.9 光合作用—温度曲线

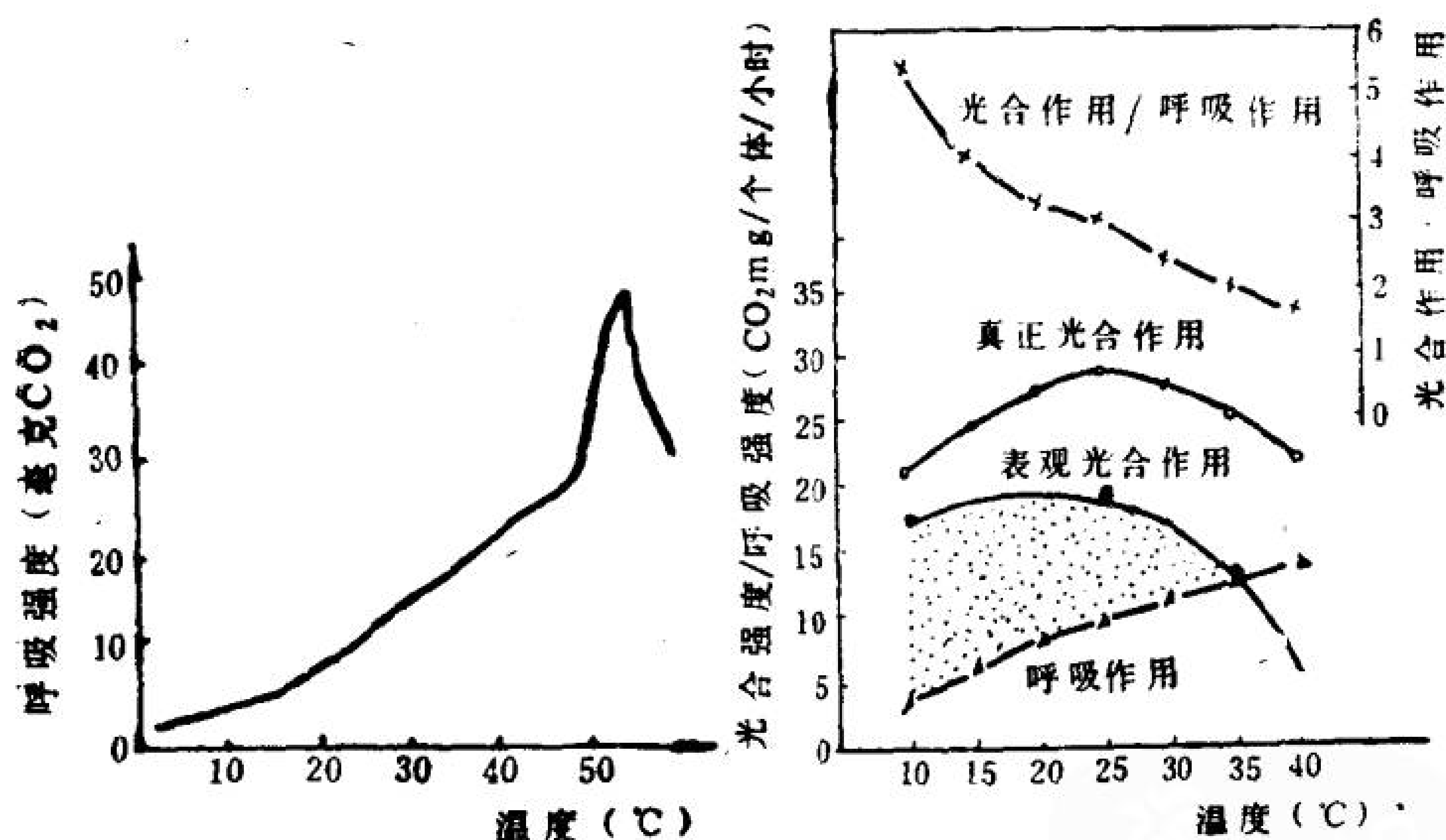



图3.10 呼吸作用—温度曲线

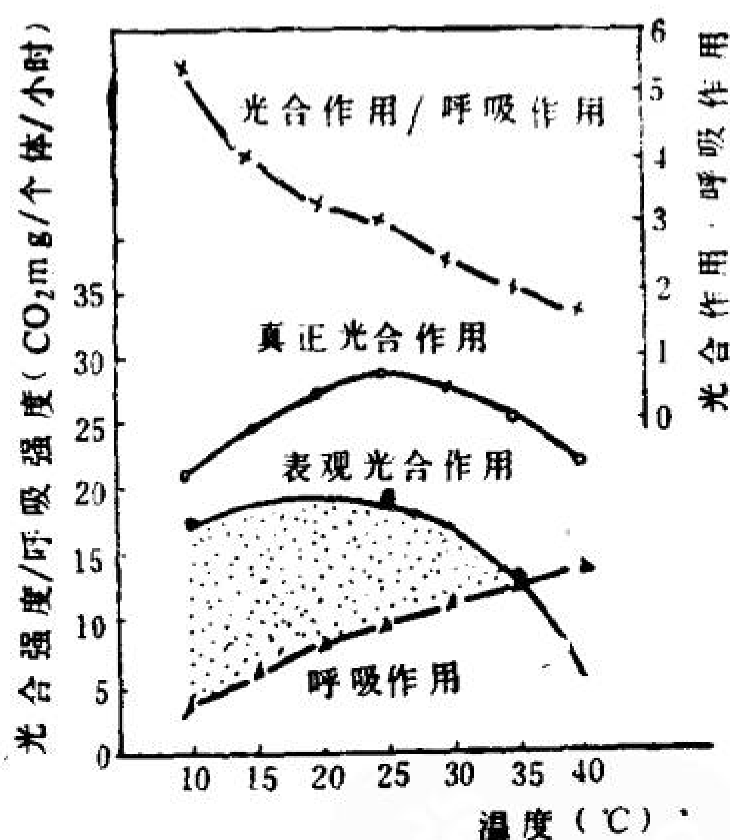



图3.11 温度对白三叶草光合强度和呼吸强度的影响

另外，温度还影响叶面积大小以及非同化器官(C)与同化器官（F）之比（C/F）等，从而间接影响光合作用和呼吸作用。

作物有机物质的增加取决于光合作用所积累的和呼吸作用所

消耗的有机物质之差。图3.12和3.13说明了作物有机体增重与空气温度的关系。这种关系只在农作物生活所必须的其它环境因子得到满足时才能成立。

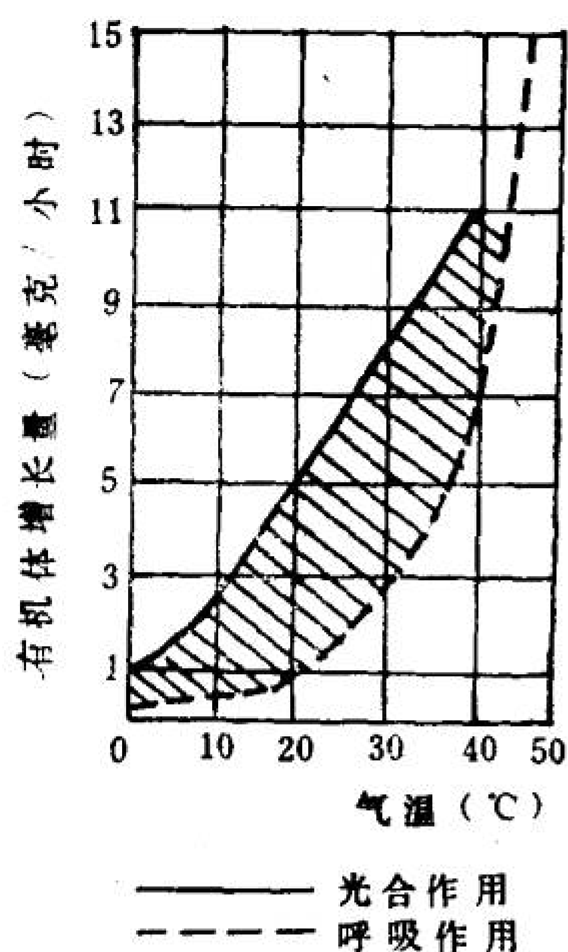



图3.12 有机体增长与气温的关系
（阴影部分为有机体的增长）

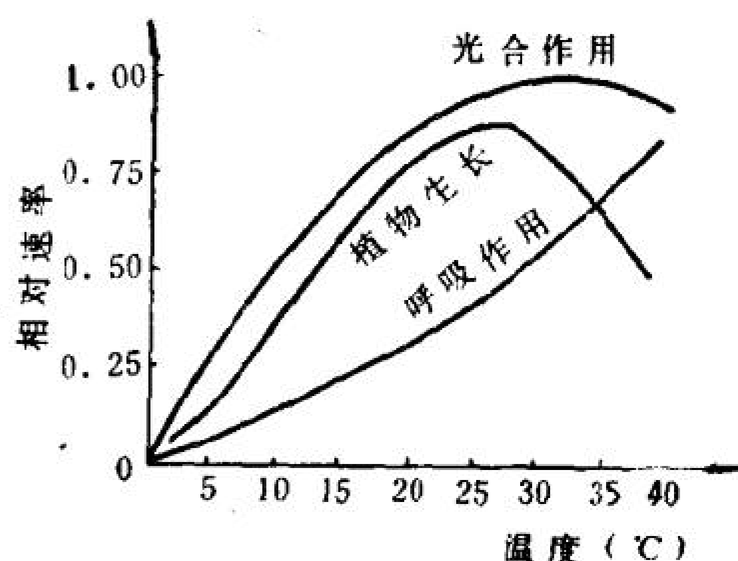



图3.13 温度对于光合作用、呼吸作用与干物质累积的效应

温度条件对植物的其它生理过程也有影响。温度通过对空气相对湿度的影响来影响植物的蒸腾作用。植物对无机养分的吸收也与温度条件有关。当温度比适温偏高或偏低时，都会使养分的吸收下降，降低程度因无机成分的种类而有不同（表3.10）。

**表3.10 水温对吸收无机成分的影响（毫克）**

| 温度范围* | $NH_4$—N | $P_2O_5$ | $K_2O$ | $SiO_2$ |
|---|---|---|---|---|
| 低温区 | 41.8 | 7.9 | 31.0 | 63.3 |
| 适温区 | 61.7 | 12.1 | 46.7 | 107.4 |
| 高温区 | 50.5 | 10.1 | 33.9 | 71.4 |

* 低温区：24—25℃；适温区：28.5—32.0℃；
高温区：37—38.5℃。

## 三、温度条件与作物引种

温度条件对作物生育的影响很大，引种新作物时，必须注意

温度条件的相似性。例如四川省北部的昭化和甘肃省南部的康县和文县，虽然地处33°N左右，因特有地形造成局地小气候条件较优越，年平均气温较高，可以栽种柑桔、无花果、枇杷、夹竹桃等亚热带作物。一般地说，在低纬度高海拔地区生长的作物能在高纬度低海拔地区找到相似的气候条件而生长。云南的云香木原分布在云南省海拔3000米的地方，引种到北京海拔50米的平原上获得成功。这也是利用气候相似性原理的具体实例。在不考虑光照影响时，根据作物对温度条件的要求以及在各种温度条件下作物引种成败的经验，作物引种有这样几条规律：

（1）北种南引（或高山引向平原）比南种北移（或平原引向高山）容易成功。因为后者是作物能否成活的问题，而前者则主要因温度可能影响产品的质量。

（2）草本植物比木本植物容易引种成功；一年生植物比多年生植物容易引种成功；落叶植物比常绿植物容易引种成功。草本植物，特别是一年生草本植物的适应性很强，这是易于引种成功的主要原因。一年生植物容易引种成功是因为它们能充分利用各个地区温暖的生长季节，在低温来临之前完成其生活周期。对两年生或多年生草本植物，在秋末冬初低温来临之前转入休眠期，具有较强的抗低温能力，可保证度过严寒而安全越冬，所以北移或向高山引种也有可能获得成功。对多年生木本植物来说，灌木比乔木较耐低温，落叶乔木比常绿树适应性强，也容易采取保护、防寒措施而引种成功。

（3）温度条件对植物生长的作用在一定程度上是相对的，各种植物都有一定的适应性，任何一种植物引种到另一地方种植后，在一定范围内，外界气候条件都能促使植物发生变异，以提高其后代适应新环境的能力。即在植物引种过程中，存在着气候驯化的现象。

（4）当然，具体引种时，不能单考虑温度的作用。在其他条件如土壤适宜时，还必须综合光温条件进行分析。

## §3 温度的累积及其对农业生物的影响——积温学说及其应用

### 一、积温学说的发展及其原则

研究温度对生物的影响，只考虑温度强度是不全面的，因为在同样的温度强度下，温度作用的时间不同，产生的效应也就有别。因此，在理论研究和实际应用中，既要注意到温度强度，还须考虑温度影响的持续时间。这就产生兼具以上两种作用的温度指标——积温。

早在1735年，法国人列奥默（Réaumur）就提出，每一种作物品种，从种植（P）到成熟（M）都要求一定量的日平均温度（$\overline{T}$）的累积值（K），即

$$\sum_{P}^{M} \overline{T} = K \qquad (3.13)$$

当$\overline{T} < 0$时，仍按0累加。

这个观点开始未被人们重视。一百年以后，鲍辛盖尔特(Boussingault, 1837）用基本上相同的方法，计算了谷类作物从播种到成熟所需的热量总值，并称这个时期的天数与相应日平均气温的乘积为“度·日”（degree-day）。

大约在40年之后，哈贝兰德（Haberland, 1876）给出了大多数农作物的积温指标，为后来确定生物的各种温度指标奠定了基础。

与此同时，蒂塞兰德（Tisserand, 1875）修正了列奥默等人的假说，即关于作物发育速率随时间与温度而变化的思想。他认为，对植物生长发育具有贡献的是日平均温度与日出日落间时数的乘积。在计算中，他舍弃了一日中所包括的黑夜期间的小时数。这是温光乘积的最初形式。

1920年，H.A.阿拉德（Allard）和W.W.加纳（Garner）观察到光周期现象，以后就有了许多关于温光乘积形式的出现，从

而使得温度对作物生长发育的表达形式更趋于客观、精密。

F.C.霍顿（Houghton）和C.P.亚格洛（Yaglou）（1923）提出了有效温度的概念，开始了对作物有效温度和生物学零度以及有效积温的研究。

本世纪50年代，积温的概念才广泛在我国应用。其后，由于生产实践的需要，很多人曾就积温的形式与种类、计算方法与应用，以及稳定性问题进行了较为深入的探讨。

根据多年的研究，特别是积温指标在农业气象服务中的应用，一般可将积温学说归纳为三个基本论点：

（1）在其它条件得到满足的前提下，温度因子对生物的发育起着主导作用。

（2）生物开始发育要求一定的下限温度；近年来的研究指出，对于某些时段的发育，还存在着上限问题。实际上，从生物体生长发育存在三基点温度出发，也应当有上限问题。

（3）生物完成某一阶段的发育，需要一定的积温。

## 二、积温的种类与求算方法

### （一）积温的种类

由于研究与应用的目的不同，积温有各种各样的表达形式。农业气象学中，应用最为广泛的是活动积温与有效积温。活动积温是作物在某时段内活动温度的总和，而有效积温是作物在某时段内有效温度的总和，可根据该时期内日平均温度进行计算。两者的表达式为：

$$A_a = \sum_{i=1}^{n} T_i \quad (T_i > B,\ 当T_i \leqslant B时,\ T_i以0计) \tag{3.14}$$

$$A_e = \sum_{i=1}^{n} (T_i - B) \quad (T_i > B,\ 当T_i \leqslant B时,\ T_i - B以0计) \tag{3.15}$$

式中，$A_a$和$A_e$分别为活动积温与有效积温，$A_e$常写作A，n为作物发育期间所经历的天数，$t_i$为其间逐日平均温度。

严格讲来，根据有效温度的概念，计算有效积温时还应去掉高于上限温度的部分，但目前仍多沿用上式计算。考虑上限的积温则称为净效积温。由（3.14）式，

$$A_e = \sum_{i=1}^{n} (T_i - B) = \sum_{i=1}^{n} T_i - nB = A_a - n \cdot B \tag{3.16}$$

从数学角度看，上式成立的基础在于B为不依n而变的常数值。然而事实上，因为它是具有生物学意义的指标，在不同生育期各种作物的B值是不同的，而且往往会因为其它条件的变化而变化。

积温的两种表示式，各有其特点与应用范围。活动积温统计比较方便，但因其包含了一部分低于B值的无效温度，使积温的稳定性较差。有效积温弥补了这一不足，用来表征农作物的发育所需的热量条件相对较好，但统计繁琐，往往给分析、计算带来一定的困难。前者多用于农业气候资源的分析，后者则多用于研究作物发育与温度条件的定量关系、建立作物发育的农业气象模式和编制农业气象预报。

不同作物以及同一作物不同品种所需的积温不同。表3.11中

**表3.11 几种主要作物所需10℃以上活动积温（℃）**

| 作物＼类型 | 早熟型 | 中熟型 | 晚熟型 |
|---|---|---|---|
| 水　稻 | 2300—2600 | 2800—3500 | 3500—4100 |
| 棉　花 | 2600—3100 | 3200—3600 | 4000 |
| 小　麦 | — | 1400—1700 | — |
| 玉　米 | 2100—2400 | 2500—2700 | >3000 |
| 高　粱 | 2200—2400 | 2500—2700 | >2800 |
| 谷　子 | 1700—1800 | 2200—2400 | 2400—2600 |
| 大　豆 | — | 2500 | >2900 |
| 马铃薯 | 1000 | 1400 | 1800 |

给出了几种主要农作物活动积温的指标（T>10℃）。

根据某些专题研究的需要，还有人提出负积温、地积温等概念，它们实质是积温基本原则在各种具体情况下的推衍与应用。

在研究作物冻害问题时，有人用负积温（0℃或某冻害临界温度以下）的数值作为严寒程度或冻害级别的标志，或建立冻害率与负积温之间的关系。上海气象科学研究所等（1982）在研究柑桔冻害时，将每小时平均气温≤－7℃的低温累加起来，其总和即为某天的负积温量，并发现柑桔冻害率与负积温存在一定的关系（图3.14），随着负积温的增加，冻害率有呈对数增长的趋势。于玲（1982）为确定冬麦冻害指标，用08时3厘米地温负值的累积值$\Sigma T_{<0}$表示“负地积温”，以冻害临界温度K以下的累积值$\Sigma T_{<K}$表示“有害负地积温”。通过研究表明，死苗率与有害负地

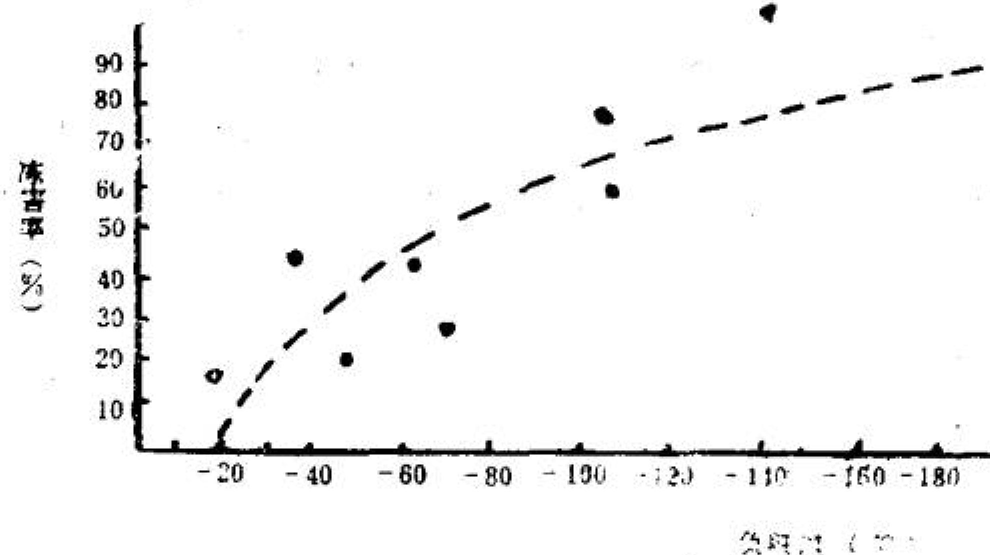



图3.14　柑桔冻害率与负积温（≤－7℃）的关系

积温之间存在近似抛物线的关系，并用负地积温与有害负地积温表示小麦冻害指标(表3.12)。负地积温确切地表示了寒冷程度，而用有害负地积温分析冻害死苗率灵敏度高、稳定性好，表示冻害指标更为确切。管周(1985)提出了冻害负积温的概念（整个冬季低于冻害临界温度的逐时低温值减去冻害临界温度后的累加值）及用最高气温与最低气温推算的方法，并作为柑桔冻害的指标。

程德瑜（1984）提出了危害积温的概念及其计算方法。危害

**表3.12 用负地积温表示的冻害指标**

| 负地积温 / 品种 | $\sum t_{\leq 0}$ (℃) | $\sum t_{\leq K}$(℃) 壮苗 | | 弱苗 | | 死苗率 (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 强冬性 | −900—−700 | $\sum t_{\leq -14}$ | −200 | $\sum t_{\leq -12}$ | −100 | 30 |
| 冬　性 | −400—−300 | $\sum t_{\leq -12}$ | −150 | $\sum t_{\leq -10}$ | −50 | 20 |
| 半冬性 | −200以上 | $\sum t_{\leq -10}$ | −40 | $\sum t_{\leq -8}$ | −30 | 10 |

积温K是指作物受温度危害过程中，逐日（或逐时）高于（或低于）临界温度的累积值，其计算式为：

$$K = \pm \sum_{i=1}^{n} (T_i - T_0)\,\Delta t \qquad (3.17)$$

式中，K为危害积温，$T_0$为高（低）温危害的临界温度，$T_i$为某一次高（低）温危害过程的逐日温度（$T_0$、$T_i$也可视具体情况取用日平均气温或日最高、最低气温、$T_i$也可用逐时温度）。在高温危害过程中，$T_i \geq T_0$，低温危害过程中，$T_i \leq T_0$，$n_0$为高（低）温危害的临界时间，n为某一次高（低）温过程的时间，且$n \geq n_0$，t为时间，$\Delta t$ 为时间步长，式中“+”、“−”号的选取是为保证K值为正值而定的，高温危害时取“+”号，低温危害时取“−”号（图3.15）。

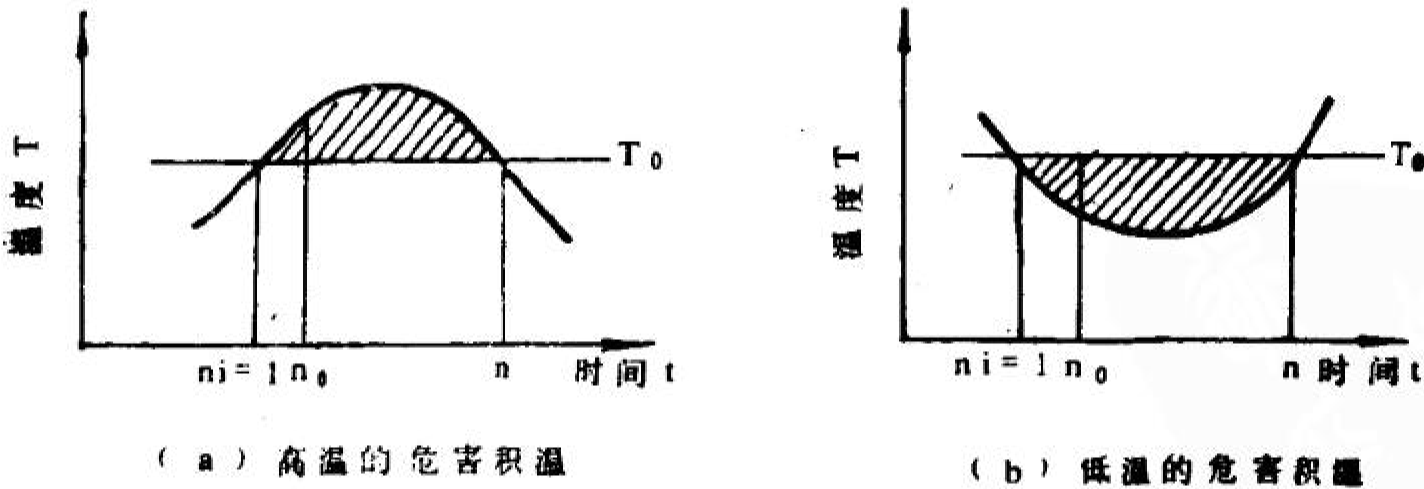



图3.15 危害积温示意图

另外，在研究棉花播种、水稻育秧以及覆盖等农业措施的气象效应时，有人提出以日平均土温或日平均泥温代替日平均气温进行累积作为地积温。由于阴雨天日平均气温并不一定低，但昼夜温差小，光照弱，作物生长发育不快，有人又提出日积温的概念，即对白天大于下限温度的逐时气温进行累加，这样更能反映出温度的有效性。时积温（度·时）是逐时气温的累加，可用来细致分析一天内植物生长发育动态与温度的关系。

近年来，在进行杂交水稻气象条件的研究时，人们逐渐注意到了高温的限制作用。为弥补原来有效积温概念的不足，提出净效温度与净效积温的概念。净效温度就是活动温度减去生物学下限温度和有效温度上限以上的数值，净效温度的累积即为净效积温。其计算式为：

$$A = n(\overline{T} - B - C) \qquad (3.18)$$

式中，A为某一生育时期的净效积温，$\overline{T}$为日平均气温，B为生物学下限温度，C为高于有效温度上限的温度数值，n为该生育时期的天数。实际资料验证表明，净效积温用于杂交水稻亲本花期相遇问题时，其稳定性优于其它各种方法（生育期法、叶龄法以及活动积温法与有效积温法）。有人亦称为实效积温。

（二）积温的求算方法

进行积温的求算，关键问题是确定上限及下限温度，就目前实际使用情况，多根据田间试验和多年多点观测资料采用图解法、最小二乘法及差值法求出。生物学下限（B）和上限（M）温度也常用人工气候箱（或室）模拟得出。如利用田间试验方法求取M值，可以这样进行：

在气温较低的季节或地区种植某作物，求出有效积温，这是在不出现上限温度的积温值。然后再用高温季节或高温地区的资料，求出生育期的天数，这是在高温下取得的最短天数。用此天数去除上述的积温，可以得到一天内植物最大可能利用的有效温度值。这个最高有效温度值加上生物学下限温度，就是所要求的

最高日平均温度。若日平均温度高出此限，则高出的部分为对作物发育无促进作用的温度。此限即为所求之上限温度值。如水稻二九南1号，在不太高的温度条件下求得的有效积温为800 ℃，在高温条件下50天就能抽穗。则800÷50＝16℃/天。如其下限温度为10℃，则10＋16＝26℃，此即为发育之上限温度。

1. 图解法求算A、B值

图解法的理论基础是作物发育速度与平均气温呈正线性相关关系。

由式（3.16）可得

$$A=\sum_{i=1}^{n}(T_i-B)=\sum_{i=1}^{n}T_i-n\cdot B$$

$$\therefore \frac{1}{n}\sum T_i=\frac{1}{n}A+B$$

$$\therefore \overline{T}=\frac{1}{n}\cdot A+B \qquad (3.19)$$

式中，n为发育期天数，则$\frac{1}{n}$为作物发育速度，$\overline{T}$为发育期间温度的平均值。因而，依据观测资料（n，$\overline{T}$）绘制图3.16。根据散布点所描直线之纵截距即为B值，斜率则为A值。

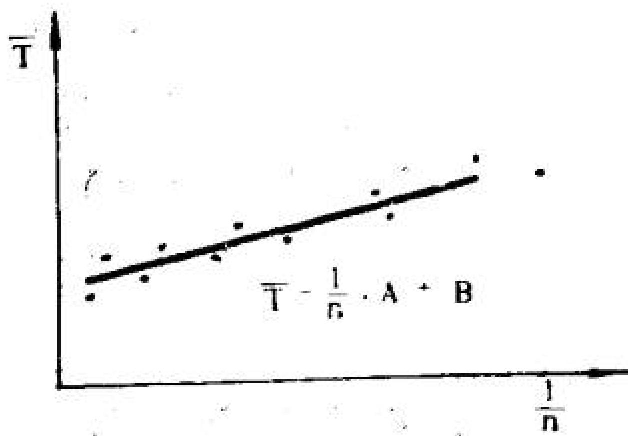



图3.16 图解法求A、B示意图

2. 最小二乘法求算A、B值

最小二乘法仍然是从有效积温的表达式（3.15）出发，在假定B、C值之后统计计算活动积温（$\Sigma t_i$）与发育期间天数(n)之间的关系，利用最小二乘法原理，求其系数即A、B值。具体做法为：

$$\Sigma T_i=A+n\cdot B \qquad (3.20)$$

令$y=\Sigma T_i$，$x=n$，则依据试验资料（多年观测资料、分期播种、

地理播种或地理分期播种资料）可得一组方程：

$$\begin{cases} y_1 = A + Bx_1 \\ y_2 = A + Bx_2 \\ \quad\vdots \\ y_n = A + Bx_n \end{cases} \tag{3.21}$$

对上述方程组，根据最小二乘法，求得拟合方程之系数，即A，B值：

$$\begin{cases} A = \dfrac{\sum x^2 \sum y - \sum x \sum xy}{n\sum x^2 - (\sum x)^2} \\ \\ B = \dfrac{n\sum xy - \sum x \sum y}{n\sum x^2 - (\sum x)^2} \end{cases} \tag{3.22}$$

$\sum t_i$为活动积温，在计算过程中需考虑B值，这和一般统计学上不同，须依照作物的生物学特性假定一个B值，再进行计算。在求得B值后，若与假定的B值相差不超过1℃时，就认为求得的B值为所要求值，否则需要重新假定B值再进行计算。最后直到求得合适的B值时为止，相应的A值即为有效积温值。

3． 差值法求算A、B、M值

差值法的基础是，求得的有效积温值应相对稳定，虽然在实际情况下它不是一个常数，但在取得合适的上限温度后，对同一作物和同一发育时期来说，用不同资料计算的有效积温应是近似的，其离差程度应为最小。表3.13系以南京地区1979年国际稻（IR-661）的分期播种资料来计算有效积温及上、下限的实例，得出从播种至始穗期以取B＝13℃，M＝26℃时离差最小，A＝1050℃最稳定。至于表中假定的上、下限取值，是根据稻株的生物学特性定的。

## 三、积温的稳定性与改进措施

### （一）积温的稳定性讨论

试验研究与实际应用中都发现，作物对积温的要求，不论是活动积温还是有效积温，都存在不很稳定的现象。即使同一作物甚至同一品种所要求的积温值也有一定的变动。全国杂交稻气象科

表3.13 差值法

| 品种 | 期次 | 播期（日/月） | 始穗（日/月） | 播种到始穗天数（天） | 下 | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 10℃ | | | | | | |
| | | | | | 上限温度 | | | | | 上限 | |
| | | | | | 无 | 26 | 27 | 28 | 29 | 无 | 26 |
| IR 661 | 1 | 25/4 | 6/8 | 103 | 1471 | 1377 | 1414 | 1439 | 1454 | 1374 | 1280 |
| | 2 | 30/4 | 6/8 | 98 | 1442 | 1348 | 1385 | 1410 | 1425 | 1350 | 1256 |
| | 3 | 10/5 | 10/8 | 91 | 1457 | 1349 | 1369 | 1417 | 1437 | 1371 | 1263 |
| | 4 | 20/5 | 16/8 | 87 | 1493 | 1369 | 1415 | 1449 | 1472 | 1412 | 1288 |
| | 5 | 1/6 | 25/8 | 85 | 1464 | 1334 | 1384 | 1420 | 1443 | 1379 | 1249 |
| | 6 | 10/6 | 2/9 | 84 | 1431 | 1293 | 1347 | 1386 | 1410 | 1349 | 1209 |
| | 7 | 20/6 | 14/9 | 86 | 1429 | 1285 | 1343 | 1384 | 1408 | 1343 | 1199 |
| 总和 | | | | | 10187 | 9356 | 9656 | 9904 | 10051 | 9574 | 8743 |
| 平均 | | | | | 1455 | 1337 | 1379 | 1415 | 1436 | 1365 | 1249 |
| 极差 | | | | | 64 | 92 | 71 | 65 | 64 | 69 | 81 |
| 标准差 | | | | | 21.4 | 32.7 | 26.5 | 22.3 | 21.6 | 33.6 | 31.2 |
| 变异系数 | | | | | 1.47 | 2.45 | 1.92 | 1.58 | 1.50 | 2.50 | 2.50 |

| 限温度 | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 11℃ | | | 12℃ | | | | | 13℃ | | | | | |
| 温度 | | | 上限温度 | | | | | 上限温度 | | | | | |
| 27 | 28 | 29 | 无 | 26 | 27 | 28 | 29 | 无 | 26 | 27 | 28 | 29 | |
| 1316 | 1341 | 1357 | 1231 | 1137 | 1173 | 1199 | 1214 | 1150 | 1056 | 1093 | 1118 | 1133 | |
| 1292 | 1318 | 1333 | 1212 | 1118 | 1154 | 1180 | 1195 | 1135 | 1041 | 1078 | 1103 | 1119 | |
| 1302 | 1330 | 1351 | 1239 | 1131 | 1170 | 1199 | 1219 | 1148 | 1040 | 1020 | 1108 | 1128 | |
| 1333 | 1368 | 1391 | 1284 | 1160 | 1206 | 1240 | 1263 | 1198 | 1074 | 1119 | 1153 | 1171 | |
| 1299 | 1335 | 1358 | 1285 | 1155 | 1205 | 1241 | 1264 | 1201 | 1071 | 1129 | 1157 | 1180 | |
| 1263 | 1302 | 1326 | 1254 | 1116 | 1170 | 1209 | 1233 | 1179 | 1041 | 1095 | 1135 | 1159 | |
| 1257 | 1298 | 1322 | 1250 | 1106 | 1164 | 1205 | 1229 | 1171 | 1028 | 1086 | 1127 | 1151 | |
| 9063 | 9292 | 9437 | 8754 | 7923 | 8242 | 8471 | 8617 | 8183 | 7352 | 7612 | 7900 | 8047 | |
| 1295 | 1327 | 1348 | 1251 | 1132 | 1177 | 1210 | 1231 | 1169 | 1050 | 1087 | 1129 | 1150 | |
| 59 | 43 | 69 | 73 | 54 | 51 | 61 | 69 | 66 | 33 | 101 | 54 | 62 | |
| 25.3 | 22.3 | 22.2 | 24.9 | 18.8 | 18.4 | 20.8 | 23.5 | 38.3 | 16.0 | 31.4 | 19.4 | 22.2 | |
| 1.95 | 1.68 | 1.64 | 1.99 | 1.66 | 1.56 | 1.72 | 1.91 | 3.28 | 1.52 | 2.88 | 1.71 | 1.93 | |

研协作组(1981)曾从水稻发育速度的两种温度模式、高温的抑制作用及品种间的差异等方面说明了积温不稳定的原因。综合众多的研究，可以认为：积温的稳定性是相对的，不稳定是绝对的；造成积温不稳定的原因是多方面的；根据具体情况，对积温的表达形式与计算方法作必要的改进与修正之后，积温仍不失为一个有效的热量指标。

造成积温不稳定的原因有这样几个方面：

（1）积温学说的假定

积温学说是建立在一种假定的理论基础上的，即作物在其生长发育进程中要求一定的环境条件，当其他因子(光照、水分等)保持适宜时，温度条件对作物发育才起主导作用。事实上，这一假定是难以满足的。因为各种作物在自然条件下所受到的环境因子的作用是错综复杂的、互相渗透的，它们必然影响作物发育速度与积温关系的成立。也就是说，作为基础的假设不成立，必然要影响到以此假设作为基础所得出的结论，即影响积温的稳定性，而使作物在一定发育时期所要求的积温值有一定的变幅。还必须指出，从近年来的试验结果以及温度三基点的观点出发，尽管其他条件适宜，发育速度——温度的关系也并非积温学说中的线性关系，而是一种非线性关系。只是在特定的温度条件下，即在适宜温度范围内，非线性关系才能为线性关系所代替。

（2）环境因子的干扰

正因为外界环境条件远非假设条件那样理想，环境因子对积温的稳定性自然产生较大的影响，这也正是人们所讨论的积温因年际、日际、地理、季节和栽培措施存在差异的主要原因。受作物感光性与感温性状况的影响，发育速度对温度的依赖性不同，有时相差很大。据国内的研究，水稻（特别是某些感光性较强的晚稻品种）在感光性较强的某些发育期（三叶—抽穗）中，积温的变动与光照时数有关，如把光照时间的影响加以订正，所得积温的稳定性大大增加。水分条件的适宜与否，往往也会对作物

发育速度产生影响。例如，在计算积温时没有考虑温度日变化的影响，而温度日变化对植物生长发育是有很大影响的。在气温日较差较大的地区或季节，白天温度较高，夜间温度较低，而实际促进发育的主要是白天高于下限温度的温度，结果用日平均温度计算出的积温值自然偏小；在气温日较差较小的地区或季节，由于夜间温度较高，使日平均温度偏高，而对作物生长发育有较大影响的日间温度却不高，自然使得积温值偏大。另外，在自然条件下，外界环境因子的不同组合，作物发育所要求的积温不可能是固定不变的。作物的发育速度与温度之间不可能是一个简单的函数关系。但是，由于热量因子的主导作用，积温应该在某一平均值附近摆动。

（3）作物本性的影响

作物对光温影响的反应即感光性与感温性问题也是属于作物本性影响的一个方面。不同品种在生态上反应的差别是很显著的，有时甚至超过了不同作物之间的差别。例如，我国水稻有千、万个品种，它们从播种到成熟所需大于10℃活动积温为2200—4200℃、有效积温为1000—2450℃，差异很大。因此，计算各种作物积温时，不能不考虑到作物的不同品种。一般说来，从大的方面把品种分类之后（如将水稻分为早、中、晚），又可再分为早熟、中熟和晚熟；再如冬小麦可分为春性、冬性、半冬性等，较细地划分品种系列可使品种之间的差别减小。

作物是由无数个体组成的，个体间有差异，尤其是对环境反应的差异。这一现象即使是对同一品种也是如此。目前确定发育期都是从作物群体平均状态得出的，积温也属于一种平均的概念。这样，作物个体的差异必然会带来积温的系统误差，使得积温为一非确定量。长沙农业气象试验站（1979）的试验表明，同一品种同时播种出苗，同时移栽于一田间小区或盆钵内，10棵观测株的主茎不是同天抽穗，按10%和80%的株数主茎抽穗日平均差3.8天，积温平均差106℃。在低温和高温下个体间的差异往往会更

大。

另外，农作物为一活的有机体，在外界环境条件下，有其自己的生长发育规律。作为一个活的有机体，它对热量条件既有一定的要求，又有一定的适应能力，因此其热量指标就必然有一个范围。在用积温来表征农作物发育速度与温度的关系时，积温应有一个变幅，而不应理解为一个固定的常数。

（4）人为造成的误差

由于受主、客观条件的影响，人为的影响有时会使积温值有较大变异。人为的影响主要包括了发育期的观测、温度资料的取得以及计算上的误差等。

作物某一发育期的出现是一个转变的过程，往往是不太明显的。由于不同观测者对发育期出现标准的理解的差异以及观测水平的高低不同，发育期出现日期的记载有时可差达几天以上。这势必造成积温数值上的差异。

取得温度值的途径有时可能不同，如大气候资料与小气候资料上的不同，测点的代表性（包括气象台站本身的规范化程度与距离试验作物的远近等等），都会使得积温值有差别，降低其稳定性。

在计算积温时，所选取的生物学下限温度与作物实际的下限温度之间可能或多或少地存在着差异，其中可能包含有某些低于生物学下限温度的“非活动温度”，或少算了某些高于生物学下限温度的活动温度。此外，对生长发育有抑制作用的或有害的高温如不扣除或不考虑其抑制作用，也会影响积温的稳定性。在积温公式中多采用日平均气温，但在自然条件下，往往会出现日平均气温低于下限温度值，而在那些日子里却有一段时间的气温高于下限温度值；或者日平均气温虽高于下限温度值，而在那些日子却有一段时间的气温低于下限温度值的情况。低于下限温度值那段时间里的温度，对作物发育自然没有作用，而高于下限温度值的温度对作物会起作用。计算时，如不考虑这些问题，也会带来

积温和下限温度值的误差。

（二）积温表达形式与求算方法的改进

在实际工作中，特别是在农业气象预报（如发育期预报）中，为了减小积温的变异，以提高预报的准确率，我国农业气象工作者提出了不少订正积温的表达形式以及计算方法上的改进措施，综观各种订正方法，可分为积温的光照条件订正、温度条件订正及回归订正三类。

1. 积温的光照条件订正

有些作物的发育对光周期比较敏感，光照对发育速率的影响很大，与温度的影响相当，甚至超过了温度的影响，比如水稻、大豆等作物，尤其是其中感光性强的品种。当用积温表示这些作物发育速度的关系时，就必须进行光照条件的订正。

在研究杂交稻生育期的热量指标时，曾使用有效光积温代替有效温度，效果较好。有效光温度（$T_0$）用下式表示：

$$T_0 = \frac{S}{S_0} \cdot T \tag{3.23}$$

式中，S为实际日照时数，$S_0$为可照时数，T为日平均气温。在实际工作中可直接求出某一时段或某一发育期积温（$\Sigma T$）与同期日照百分率（K）的乘积，即为该发育期的有效光积温（$\Sigma T_0$）

$$\Sigma T_0 = K \cdot \Sigma T \tag{3.24}$$

据不同年份与不同地点的杂交稻本田发育期≥10℃积温与有效光积温的比较，明显可见有效光积温较为稳定。

更为简便的订正方法是把感光性较强的作物品种，在某一光照长度下所要求的积温订正为另一光照长度下的积温，计算公式为：

$$\Sigma T_B = (1 + f \cdot \Delta S)\, \Sigma T_A \tag{3.25}$$

式中，$\Sigma T_A$和$\Sigma T_B$分别为日平均可照时数$S_A$、$S_B$条件下的积温，$\Delta S$为两地或两时段日平均可照时数的差值，即

$$\Delta S = S_A - S_B \tag{3.26}$$

f为日平均可照时数变化1小时所引起的积温变化量与$\Sigma T_A$的比值，对具体品种而言，f为常数，可通过试验求得。根据在贵州铜仁对杂交水稻、农垦58等所作的试验，f值约为0.08—1.12。还规定，短日照作物的f取正值，长日照作物的f取负值。

2． 积温的温度条件订正

温度数值（即温度强度）的大小，对作物发育速度的影响是不一样的。夜间温度的高低及日较差的大小等，也会影响积温的稳定性，这些都应给予考虑。

由式3.15，可得

$$\frac{1}{n}=\frac{T-B}{A}=\alpha T-\beta \tag{3.27}$$

或

$$n=\frac{A}{T-B} \tag{3.28}$$

式中，n为发育期天数，$\frac{1}{n}$则表示了作物发育速度，T为生育期平均气温。上式假定了作物发育速度随温度呈线性变化，这一假设有着严重的不足。基于温度三基点理论及温度有效性，有人提出一种温度因素对作物发育速度影响的非线性模式，以替代积温公式中的线性假设。图3.17系依据帕拉金资料绘制的植物生长量随温

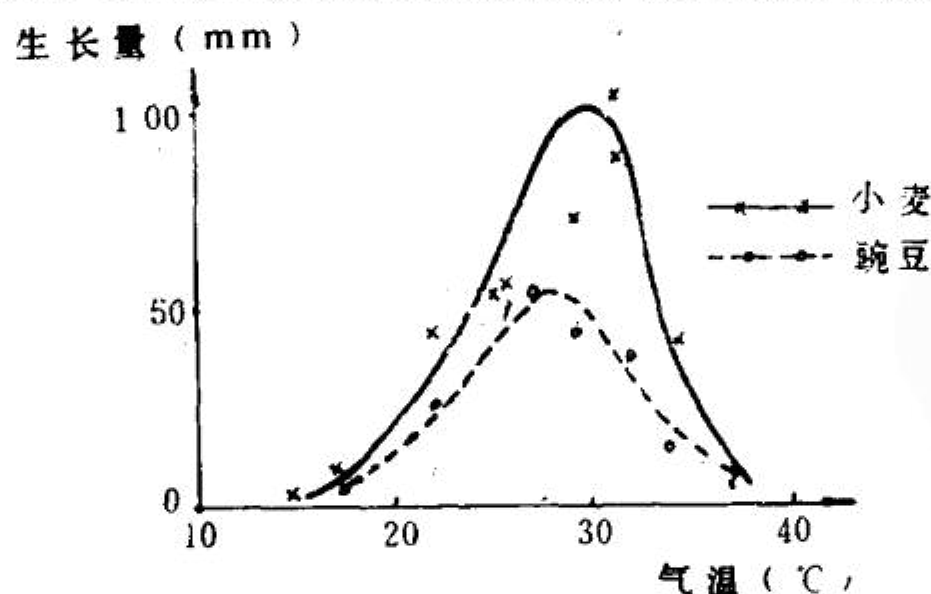



图3.17 植物生长量的温度曲线
（据帕拉金资料绘制）

度的变化图，说明了植物生育是温度的非线性函数。在此基础上可导出一个新的有效积温表达式，称为有效积温变量A（T）。

在综合考虑上、下限温度对作物发育速度影响的基础上，可得温度的非线性模式：

$$\frac{1}{n}=\frac{1}{K}(T-B)^{1+P}(M-T)^{1+Q} \qquad (3.29)$$

式中，M、B为作物发育速度等于零的上、下限温度，K、P、Q为经验参数，并均＞0。上式的基本图形如图3.18所示。该图反映了三个问题：其一，反映了温度三基点，当温度T等于下限温度B和上限温度M时，发育速度为0；其二，在三基点附近，发育速度随温度的变化比较缓慢；其三，当P＞Q时，最适温度$T_0>\frac{B+M}{2}$，发育速度曲线右偏，说明从下限温度到最适点的温度范围宽于最适点到最高温度的温度范围，也就是说，低温下发育速度随温度升高的增加速率不如温度超过最适点之后发育速度的衰减来得快

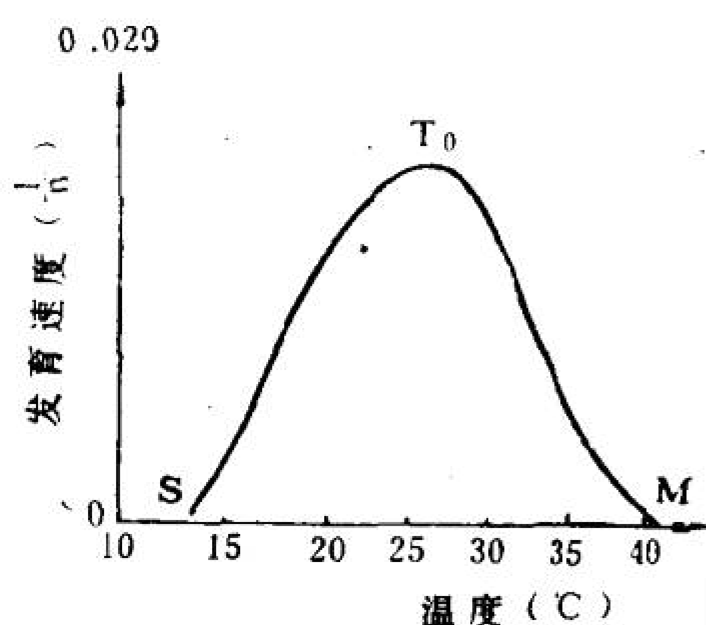



图3.18　作物发育非线性温度模式

在（3.29）式中令：

$$A(T)=K(T-B)^{-P}(M-T)^{-(1+Q)} \qquad (3.30)$$

则有

$$A(T) = \Sigma T - nB \tag{3.31}$$

A（T）为温度的函数，称为有效积温变量。用实际资料可以验证，A（T）值与有效积温的实际值十分接近（图3.19）。

在有效气温（或温度当量）的基础上，可以当量积温（$\Sigma\theta$）改进（3.13）式的活动积温$A_a$：

$$\Sigma\theta = K(T) \cdot \Sigma T \tag{3.32}$$

式中，$\Sigma T = A_a$，K（T）为温强系数。上式建立了当量积温与活动积温的联系。K（T）计算式为

$$K(T) = \frac{n_0 T_0}{\Sigma t} \tag{3.33}$$

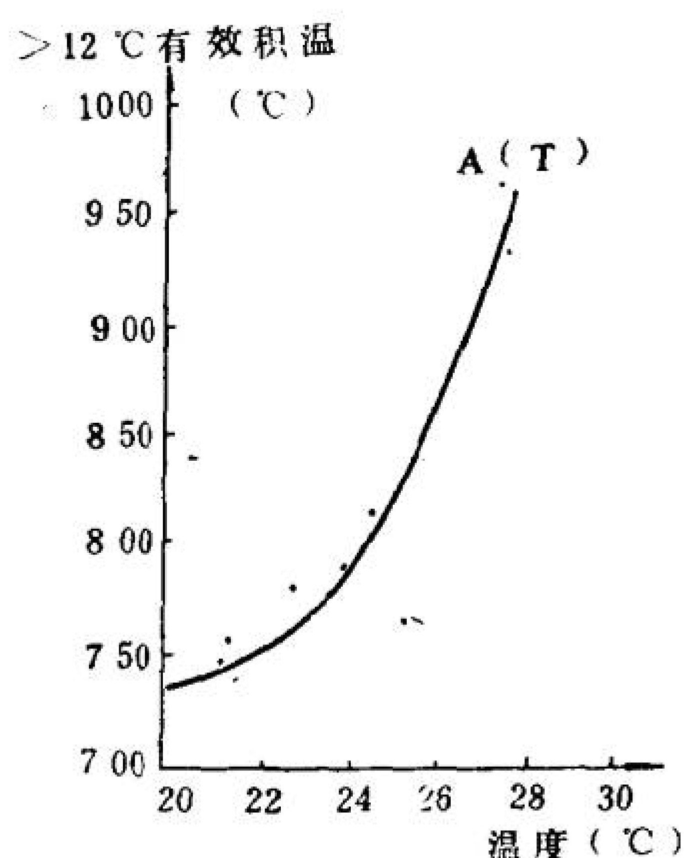



图3.19　广陆良A从播种到始穗的A（T）值与实际有效积温（点为实际值）

$n_0$为发育速度最快（温度为$T_0$）时的发育最短天数，根据实验资料并依照上式可确定之。在实际应用中，为简便起见，可取几个品种（如二九青、广陆矮4号、汕优6号、IR26）温强系数的平均值（表3.14）作为通用系数，不再考虑品种间的差别。

当量积温在活动积温的基础上，通过温强系数K（T）反映出积温累积期间平均温度的有效性，稳定性也较好（表3.15）。

**表3.14　水稻4个品种的温强系数平均值K（T）（播种—抽穗）**

| 平均温强 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30℃ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| K(T) | 0.81 | 0.86 | 0.91 | 0.95 | 0.99 | 1.02 | 1.03 | 1.04 | 1.03 | 1.00 | 0.94 |

**表3.15　四种积温指标的稳定性比较（播种—抽穗）**

| 变异系数(%)　积温(℃)　品种 | $\Sigma T$ | $A_{>10}$ | $A_{12-26}$ | $\Sigma\vartheta$ |
|---|---|---|---|---|
| IR26 | 3.58 | 3.03 | 3.31 | 2.99 |
| 珍汕97A | 5.69 | 5.54 | 5.06 | 5.03 |
| 汕优6号 | 4.59 | 3.57 | 3.55 | 3.64 |
| 平　均 | 4.69 | 4.05 | 3.97 | 3.79 |

全国杂交稻气象科研协作组（1981）提出了气温日周期变化比较量（$T_{mQ}$）并用以对有效积温进行订正。所谓气温日周期变化比较量是指作物生育期的平均气温在20—30℃范围内，同一平均气温值的气温日周期变化的程度：

$$\left.\begin{aligned} T_{mQ} &= \frac{1}{10}\int_{20}^{30} T_m dT = \frac{1}{10}\int_{20}^{30} (\alpha T-\beta)\ dT \\ T_{mQ} &= 25\alpha-\beta \end{aligned}\right\} \tag{3.34}$$

经研究，用气温日周期变化比较量$T_{mQ}$与同一平均气温条件下的有效积温距平值$\Delta A$可以拟合为下列的估算方程：

$$\Delta A = 1325.39 - 61.64T_{mQ} \tag{3.35}$$

从而可算得各地不同品种的有效积温估算值：

$$A = \overline{A} + \Delta A = \overline{A} + 1325.39 - 61.64T_{mQ} \tag{3.36}$$

$\overline{A}$为供试品种自播种至抽穗期间的平均积温。

另外，在一些具体研究中还有人建议用日最高气温或最低气温代表平均气温进行积温计算。

3． 积温的回归订正

为了研究积温的稳定性，江苏省杂交稻气象科研协作组（1978、1980）曾提出用播种日期（含日照长短的意义）、降水量建立回归方程，对积温指标进行订正，称为动态积温。试图用多因子的综合影响预测杂交水稻的亲本花期。

首先分析父、母本的活动积温(y)与当年播种期的早晚（x、

播种日期距4月1日的天数）、始穗前30天内的降水量多少（$x_2$，毫米）的关系，建立父本的积温方程：

$$y_{父}=2839.6-7.49x_1+1.60x_2 \tag{3.37}$$

式中，$y_{父}$为父本植株当年播种至始穗所需活动积温指标值（因为这样计算的活动积温是随播种早晚等不同而变动的，故称其为动态积温）。同理，再建立母本积温方程：

$$y_{母}=1765.0-4.36x_1 \tag{3.38}$$

式中，$y_{母}$为母本稻株当年播种至始穗所需活动积温（动态积温）值。

根据（3.37）和（3.38）式，将当年的$x_1$、$x_2$值代入，即可算得当年父、母本播种至始穗所需的动态积温指标，然后按一般积温预测花期相遇的方法，即可预测花期。

**四、积温在农业生产中的应用**

积温作为一个重要的温度指标，在农业气象中占有重要地位，在农业生产中已广泛应用。就目前研究状况，主要可分为农业生物生长发育的积温模式；农业气候热量资源的分析以及农业气象预报服务等三个方面。

（一）农业生物生长发育的积温模式

近年来，人们对小麦、水稻叶龄、分蘖以及干物质积累与相应积温的关系进行了较深入的研究，并建立了一系列模式。

1. 叶龄的积温模式

小麦叶片数的增加受温度和水肥条件等因素的影响，还与温度条件关系最为密切。而在极端恶劣的条件下，水肥条件通常只影响叶片的大小，而对叶龄的增长速度影响不大。定株观测的资料分析表明，小麦叶龄（X）与大于0℃的活动积温（ΣT）有线性关系，可表示为

$$X=a+b\Sigma T \tag{3.39}$$

式中，a，b为待定系数，依各品种观测资料拟合的回归方程列于表3.16中。

**表3.16 小麦品种的叶龄与积温的关系**

| 品 种 | 拟合公式 | 相关系数 | 样本数n | 试验年份 |
|---|---|---|---|---|
| 农大139 | $\hat{X}=0.0120\Sigma T-1.22$ | 0.988*** | 40 | 1974 |
| 农大139 | $\hat{X}=0.018\Sigma T-0.615$ | 0.989*** | 61 | 1980 |
| 红良4号 | $\hat{X}=0.0121\Sigma T-0.868$ | 0.983*** | 65 | 1980 |
| 京作348 | $\hat{X}=0.0120\Sigma T-0.712$ | 0.988*** | 63 | 1980 |
| 北京15 | $\hat{X}=0.0124\Sigma T-1.19$ | 0.959*** | 61 | 1980 |

*** 表示信度水平为0.001

由（3.39）式，可确定每增加一个叶龄所需的积温。如“农大139”为83.3—92.6℃，“红良4号”为82.6℃，“京作348”为83.3℃，“北京15”为80.6℃。

江苏省杂交水稻气象科研协作组（1981）根据全省南北各试验点的资料分析表明：杂交水稻叶片数（N）与播种到该叶片出现时>10℃总积温（ΣT）之间存在着明显的对数关系(图3.20)，其系数值因品种而异，对汕优2号拟合的结果为

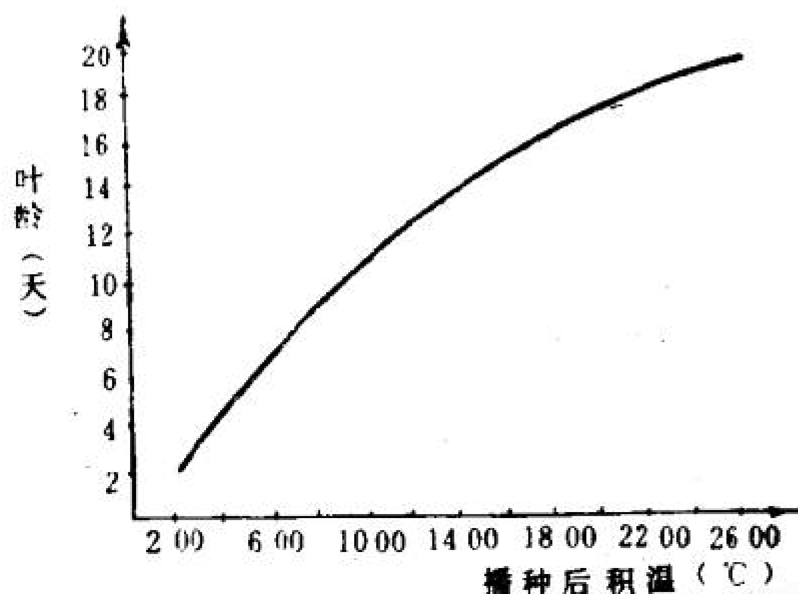



图3.20 叶龄与积温关系曲线
（汕优2号，4/25播种，N=73，1981）

$$N_{汕2}=-41.12+7.6\ln(\Sigma T)$$
$$(n=73,\ r=0.985) \qquad (3.40)$$

2． 分蘖的积温模式

分析小麦分蘖数与冬前积温的关系，可建立不同形式的积温模式：

指数模式：$y = y_0 e^{\alpha+\beta\Sigma T}$ (3.41)

Logistic 曲 线 模式：$y = \dfrac{y_m}{1+e^{\alpha+\beta\Sigma T}}$ (3.42)

Compertz曲线模式：$y = y_m e^{-e^{C-D\Sigma T}}$ (3.43)

上列式中，y为包括主茎在内的单株茎数，ΣT为冬前积温，其它为有关常数或系数。

根据水稻群体分蘖的消长变化，可建立模式：

$$y_x = a_0(a_f - a_0)e^{\frac{-c(d-x)^2}{x^2}} \quad (3.44)$$

式中，$y_x$指积温为x时单位面积上水稻的总茎数，x为水稻移栽后10℃以上有效积温，$a_0$为单位面积的基本苗数，$a_f$为分蘖高峰时的总茎数，c和d为经验系数，由实验资料求得。

3\. 干物质增长的积温模式

在对江苏省杂交水稻、三麦气象条件试验研究时，对干物质累积与其间积温的关系进行了探讨，证明其关系可用logistic方程（即“S”型曲线）进行拟合，效果很好，其一般式为

$$W = \frac{c}{1+e^{a-b\Sigma T}} \quad (3.45)$$

在对三麦气象条件研究时，考虑到地区差异，以一站点作为基本点进行日照时数的订正，求得了江苏省各地小麦灌浆的气象模式：

$$W = \frac{C}{1+e^{a-b\Sigma T}} + (D + E\cdot\Delta\Sigma S) \quad (3.46)$$

式中，W、ΣT分别为干物重及积温值，a、b、c为参数，ΔΣS为推测地与基准地之间抽穗后累积日照时数差值，E为日照参值方程系数，D为常数项。所有参数都由实验求得。

此外，利用积温，还可建立昆虫生长发育及其消长的动态模式、林木演替的生态模式及畜产品产量模式等。

（二）农业气候热量资源的分析

积温作为热量资源的主要指标之一，可通过一地区积温值的大小（全年的、生长季或其他特定季节的）。季节分配与保证率状况的分析，判定该地区热量条件的优劣、规划种植制度，以及确定作物的产量与品质。另外，根据一地积温条件以及作物、品种的要求，还可作为作物引种的科学依据。

（三）农业气象预报服务

积温法是农业气象预报常用方法之一，一般可用以进行作物发育期、收获期以及病虫发生、发展的预报。近年来在杂交水稻制种花期相遇预测中应用积温预测，效果很好。

将积温公式稍作变换，可得预报应用公式：

$$D = D_1 + \frac{A}{T - B} \qquad (3.47)$$

式中，D为所要预报的发育期日期，$D_1$为前一发育时期出现日期，A为由前一发育时期到预报发育时期之间的有效积温，T为两发育期间的平均气温，B为下限温度。对感光性强的品种，需作光温系数订正。如对感光性强的水稻品种，其预报式应为

$$n = n_1 + \frac{A - n_1(T_1 - B)\cdot K}{(T_2 - B)} \qquad (3.48)$$

式中，A为总有效积温，$T_1$，$T_2$分别为长、短光照期间的平均温度，$n_1$为长光照期间的发育期天数，n为发育期总天数，K、B为光温系数和生物学下限温度。

根据作物发育的非线性温度模式和有效积温变量的概念，在作物发育期预报时以A（T）代替A，则有

$$n = \frac{A(T)}{T - B} \qquad (3.49)$$

江苏省依照地理分期播种资料证明，在做杂交稻父、母本花

期相遇预测时，有效积温法优于活动积温和生育期天数法。其计算图式如图3.21所示。

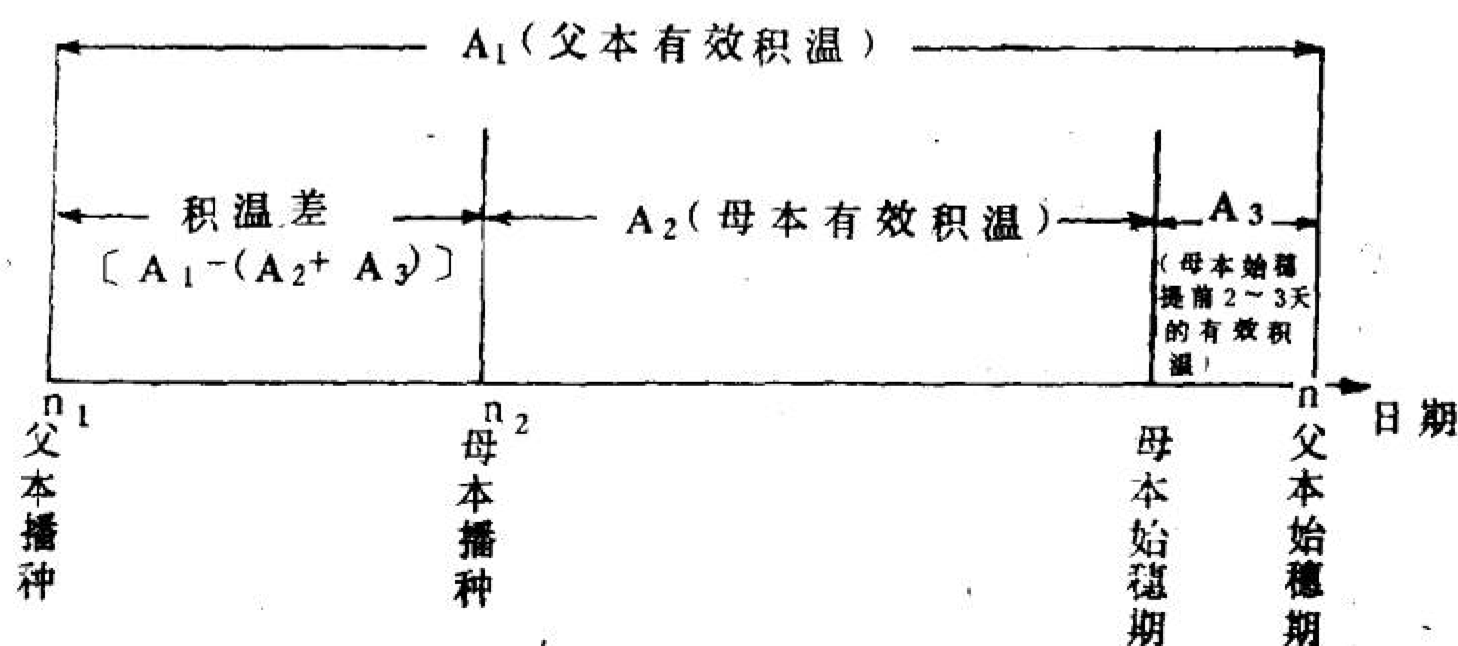



图3.21　杂交水稻花期相遇计算图式

## §4　温度的周期性变化及其对农业生物的影响

### 一、作物的感温性

热量条件随各地的纬度、经度、拔海高度、地形和栽培季节等不同而变化。温度是作物发育过程中不可缺少的条件，但不同作物、品种对温度的要求与反应不同。品种受温度的影响表现出发育速度不同的特性，称为感温性。作物感温性的强弱通常以高温下能促进抽穗日数来表示，某品种在高温下能显著表现出缩短抽穗日数，则该品种感温性强，反之则弱。前者又可称为对温度反应敏感，后者不敏感。

丁颖等(1978)对我国水稻品种进行了感温性试验，提出了高温出穗促进率的概念并以此作为感温性级别判别标准。他们用地理纬度相近而海拔不同、温度相差较大的广州(23°08′N,8.8m)和蒙自（23°20′N，1300m）的资料（广州3月19日播种，蒙自3月16日播种，出苗到抽穗的平均温度分别为24.5℃和22.3℃），对120多个水稻品种的出穗促进率进行比较。出穗促进率计算公式

为：

$$\text{高温出穗促进率}(\%)=\frac{\text{蒙自的出穗日数}-\text{广州的出穗日数}}{\text{蒙自的出穗日数}}\times 100\% \qquad (3.50)$$

出穗促进率大的，品种的感温性强，相反则弱。根据计算结果，可将我国水稻品种的感温性分为九个级别（表3.17）。试验表明所有水稻品种都是感温的，但晚稻的感温性比中稻强，中稻的感温性又比早稻强。

有些作物在其发育过程中，需要一定的低温环境或低温刺激，否则不能正常抽穗结实，如小麦。这是作物感温效应的另一特点。这些作物，在其生长发育过程中，只有经受一定的低温刺激，才能完成由生长向发育的转化。不同的作物品种，在春化阶段需要不同的低温值和持续时间，起源于北方冬性强的品种，需要有更低的温度和更长的持续时间（表3.18）。

**二、温度的昼夜变化与作物的温周期现象**

在自然条件下，气温呈现着周期性变化。许多植物长期生活于某一自然条件下，适应了某种节律性变化规律，并遗传成为其生物学特性之一，这一现象称为作物的温周期现象。温特（F·W.Went，1944）曾提出季节的、月的和日的温周期的概念，其中，研究最多的是日温周期现象。

植物的日温周期现象，是大多数植物，尤其是农作物所共有的普遍现象。植物如果不能满足它遗传习性所需要的光周期和日温周期，就不能完成它的生长发育进程。不同植物由于所处的地理位置和环境条件不同，通过对本地日温周期季节变化的长期适应和遗传，形成各自不同的日温周期，如热带植物适应于昼夜温度高、振幅较小的日温周期；温带植物则适应于昼温较高、夜温较低、振幅较大的日温周期。图3.22是余优森（1986）根据试验得出的适宜温度指标模拟绘制出的水稻、小麦、棉花、马铃薯开花期适宜的日温周期。

表3.17 我国水稻品种的感温性

| 感温性级别 | 出穗促进率（%） | 代表品种 |
| --- | --- | --- |
| 1 | 负值—5.0 | |
| 2 | 5.1—10.0 | |
| 3 | 10.1—15.0 | 公交10号 |
| 4 | 15.1—20.0 | 米泉黑芒、农林11号、夏至白18、昆明小白谷 |
| 5 | 20.1—25.0 | 国光、葡萄黄、有芒早粳、早银占、昆明半截芒 |
| 6 | 25.1—30.0 | 富国、蚌蛛芒、浙场9号、矮仔占、毫安公 |
| 7 | 30.1—35.0 | 黑水稻、老来青、三排种、下关沱沱黄 |
| 8 | 35.1—40.0 | 香稻、小红稻、白秋其、香谷 |
| 9 | 40.1—45.0 | 塘埔矮、镇雄牛尾托 |

**表3.18 不同冬、春性类型的小麦春化阶段所需温度范围和天数**

| 小麦类别 | 春化所需的温度范围（℃） | 春化所需的天数 |
|---|---|---|
| 冬性类 | 0—5 | 30—70 |
| 半冬性类 | 3—15 | 20—30 |
| 春性类 | 5—20 | 3—15 |

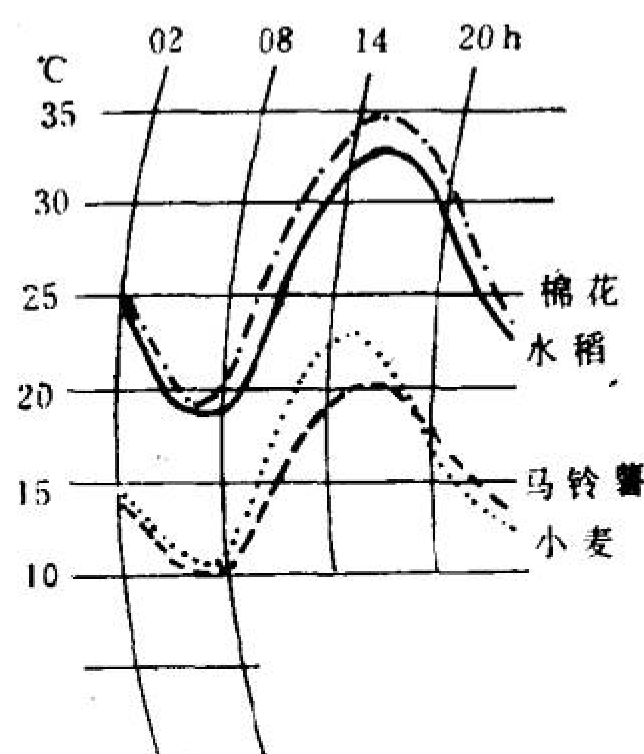



图3.22 几种主要作物开花期适宜的日温周期

## 三、气温日变化与农作物的生长发育及产量形成

气温日变化（或昼夜变温）对作物生长发育有很大影响，更重要的是在一定日平均温度水平上的气温日变化的影响，这实为日温周期的有效性问题。在日温周期振幅有效的范围内，即日最高温度不超过作物的上限温度，日最低温度不低于下限温度时，作物的生长发育速度随温度升高而加快；但如超过所需的最高、最低界限温度，成为无效温度，那不仅对作物无利，反会造成伤害、死亡。矢吹等（1957）曾在变温条件下对水稻发芽进行试验（表3.19），平均温度为35℃时，无日较差的发芽率高，而日

表3.19 水稻发芽率（%）与温度日较差

| 平均温度（℃）＼较差（℃）＼发芽率（%） | 0.0 | 2.5 | 5.0 | 7.5 | 10.0 |
|---|---|---|---|---|---|
| 25 | 60 | 60 | 68 | 74 | 70 |
| 30 | 60 | 64 | 66 | 60 | 12 |
| 35 | 80 | 72 | 76 | 58 | 0 |

较差大的发芽率低，等于10℃时甚至不发芽。平均温度为25℃时，则反之，但差异不大。不同作物发芽对温度高低及较差大小的要求不同，喜凉作物发芽要求的温度相对较低，平均温度太高或日变化中的高温部分对其发芽不利，而喜热作物则相反，表3.20说明了这一情况（长谷等，1975）。

昼夜变温对植物的生长有着明显的促进作用。温特（F.W. Went, 1944）的著名试验（图3.23）表明，番茄的生长与结实，在昼夜变温（白天26.5℃、夜间7—19℃）的情况下比在恒温（26.5℃）下要好得多。

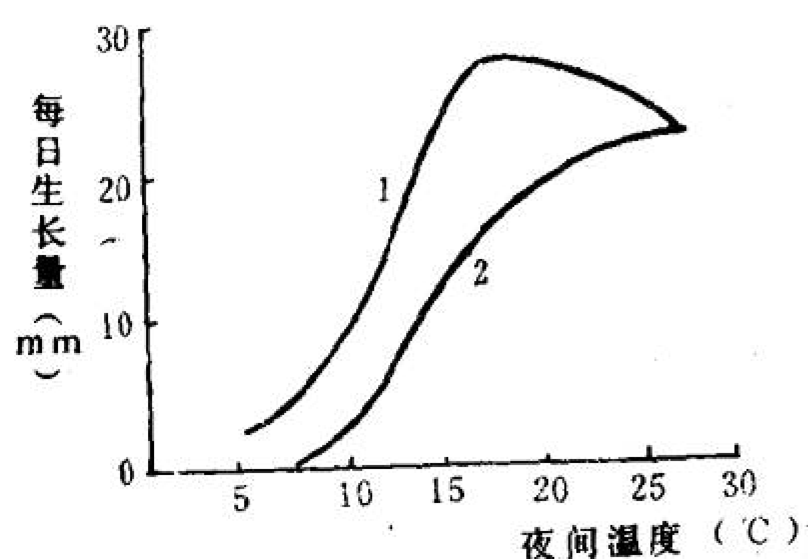



图3.23 在恒定及昼夜变温下番茄茎生长量比较
（1.白天温度为26.5℃，2.昼夜温度不变）

关于昼夜温度对作物生长发育的影响，A.A.马里塞夫认为，由于长日照作物发育过程主要在白天进行，短日照作物主要在黑暗中进行，因此当日间气温高的时候，长日照作物的发育速

表3.20 不同作物发芽率（%）同平均温度与变幅（℃）之关系

| 作物 \ 发芽率 \ 温度 \ 变幅 | 10 | | 15 | | 20 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ±0 | ±9 | ±0 | ±9 | ±0 | ±9 |
| 小　麦 | 100 | 100 | 100 | 98 | 98 | 92 |
| 大　麦 | 100 | 96 | 100 | 98 | 98 | 94 |
| 水　稻 | 0 | 100 | 90 | 100 | 100 | 100 |

| 作物 \ 发芽率 \ 温度 \ 变幅 | 25 | | 30 | | 35 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ±0 | ±9 | ±0 | ±9 | ±0 | ±9 |
| 小　麦 | 98 | 98 | 98 | 96 | 76 | 34 |
| 大　麦 | 36 | 30 | 8 | 8 | 0 | 0 |
| 水　稻 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

度加快，而当夜间气温高的时候，短日照作物发育速度加快（表3.21）。

昼、夜温度及其配合对籽粒灌浆、空粒及产量形成也有重要影响。日本柴田等（1970）在平均温度相同而昼夜温度不同的各

表3.21 阿尔泰地区不同海拔几种作物出苗到抽穗的时间

| 作　物 | 出苗到抽穗持续时间（天） | | 日平均气温（℃） | | 13时气温（℃） | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 470米 | 1000米 | 470米 | 1000米 | 470米 | 1000米 |
| 春小麦 | 64 | 55 | 15.5 | 13.9 | 18.5 | 19.3 |
| 大　麦 | 60 | 51 | 15.3 | 13.7 | 18.3 | 19.0 |
| 马铃薯 | 48 | 41 | 16.9 | 14.8 | 20.2 | 20.4 |
| 粟 | 43 | 56 | 14.7 | 14.1 | 17.7 | 19.5 |
| 黄　瓜 | 38 | 51 | 16.0 | 15.5 | 19.0 | 21.0 |

种处理下研究了水稻花粉细胞减数分裂期气温与不孕率的关系（图3.24）。图中，圆圈点为相同温度下最低不孕率点，开花的适宜温度是白天温度24℃和夜晚20℃之时。江苏省（1979）的试验说明，只要植株健壮，功能叶正常，日照充足，日较差大可减轻低温危害（表3.22）。全国杂交稻气象科研协作组（1980）的研究也证明，水稻冷害指标有随日较差增大而降低的趋势。

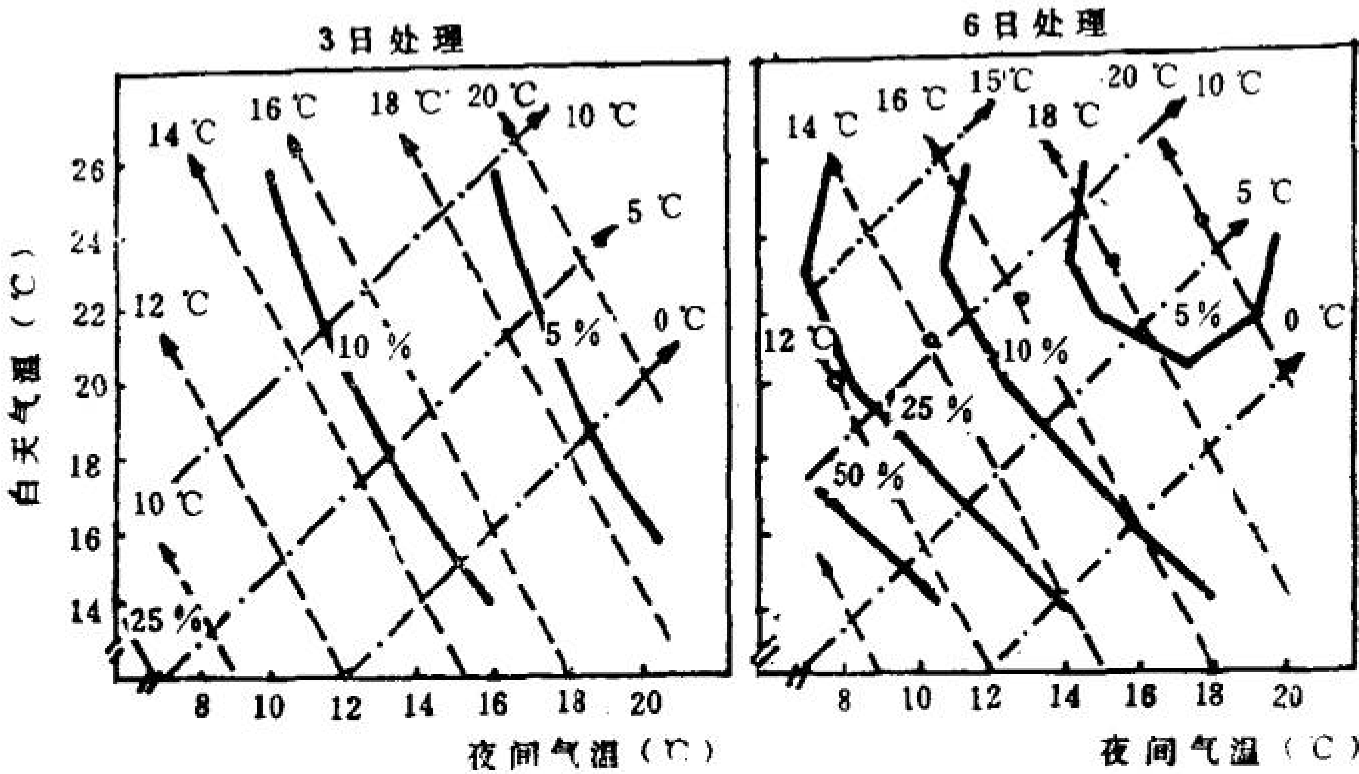



图3.24 不结实稻谷百分率与减数分裂期的白天和夜间温度之关系
（——平均气温，—·—·—昼夜温差，——不结实稻谷百分率的等值线）

**表3.22 灌浆期间气温日较差与秕粒率的关系**

**（汕优3号，1979）**

| 花期（月/日） | 8/20 | 8/23 | 8/27 | 9/6 | 9/17 | 9/21 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 平均温度(℃) | 23.4 | 23.1 | 22.4 | 21.2 | 18.6 | 17.3 |
| 平均日较差(℃) | 6.9 | 6.7 | 6.4 | 6.9 | 10.1 | 11.6 |
| 秕粒率 | 21.3 | 22.4 | 26.5 | 27.3 | 17.3 | 22.6 |

为研究昼夜温度对小麦灌浆速度的影响，刘振英等（1985）统计了白天平均温度和夜间平均温度与籽粒灌浆的关系。昼、夜温度依王仁煜公式计算：

$$\left.\begin{aligned} T_{昼} &= \overline{T}_{日均} + \frac{1}{4}(T_M - T_m) \\ T_{夜} &= \overline{T}_{日均} - \frac{1}{4}(T_M - T_m) \end{aligned}\right\} \tag{3.51}$$

式中，$T_M$，$T_m$分别为日最高、最低温度。灌浆速度（y）与白天、夜间平均温度呈二次曲线关系〔（3.52）和（3.53）式，图3.25〕：

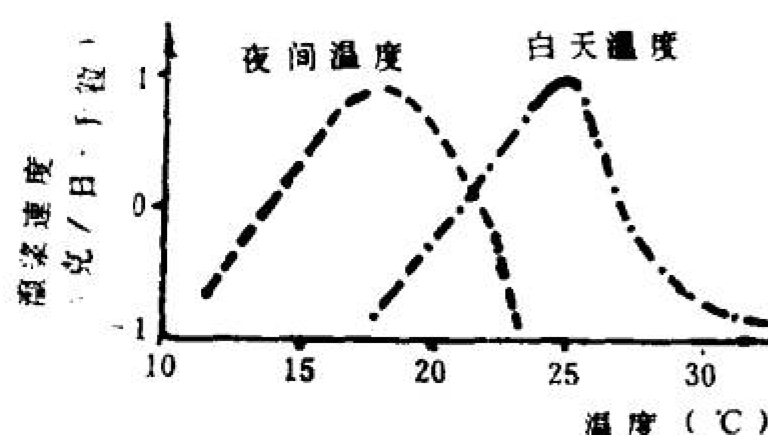



图3.25　昼夜温度对灌浆速度的影响

$$y = -15.0159 - 1.25144\overline{T}_{昼} - 0.0254\overline{T}_{昼}^{2}$$

$$(n = 30,\ F > F_{0.01}) \tag{3.52}$$

$$y = -7.31312 + 0.8259\overline{T}_{夜} - 0.02235 T_{夜}^{2}$$

$$(n = 30,\ F > F_{0.01}) \tag{3.53}$$

从图3.25可看出，白天和夜晚灌浆速度呈直线上升时的温度范围、灌浆速度最大时的温度值以及灌浆速度为负值时的温度上、下限值。而从昼、夜温度的配合来分析（图3.26），以昼温25℃左右、夜温18℃左右，灌浆最为有利。昼温<20℃，夜温<15℃，y为负值。昼温高于27.5℃，不论夜温高低，y均为负值。

关于昼夜温差对作物产量形成的影响，一般认为，在一定温度范围内，昼夜温差较大，作物产量越高。这是因为白天适当高

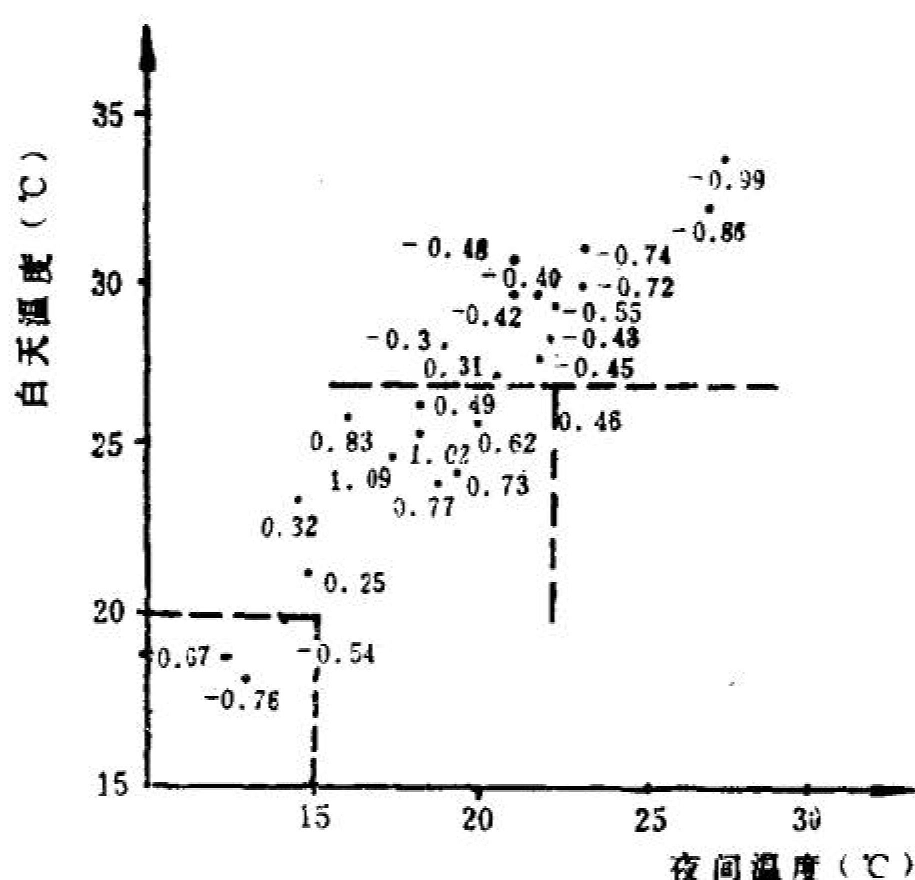



图3.26　昼夜温度配合对灌浆速度的影响
（图中数字为灌浆速度）

温有利于光合作用，夜间适当低温可减弱呼吸作用，这样净积累就增多。据上海市气象局等（1974）观测，昼夜温差如增加1℃，则千粒重可增加0.5—1.0克（表3.23）。

**表3.23　早稻开花后10～25天的昼夜温差与千粒重的关系**

| 昼夜温差（℃） | 6.6—7.0 | 7.1—7.5 | 7.6—7.8 | 7.9—8.0 |
|---|---|---|---|---|
| 千粒重（g） | 25.0 | 25.9 | 26.1 | 26.4 |

必须指出，日温周期对作物产量的影响有一定的条件，其前提是决定一日之较差大小的最高与最低气温会对产量产生什么影响。曹永华（1982）曾就此问题对拉萨与北京两地气温日较差大小与小麦千粒重的关系作了分析，指出高低温配合好（不是日较差大）是拉萨春小麦产量高于北京的一个重要原因。小麦灌浆期间，当日最高气温高于30℃时，籽粒灌浆就受到抑制，粒重增长速度减慢或停止。北京小麦灌浆期间的平均最高气温为26—31℃，

极端最高气温能达32—34℃，于是小麦出现了“午休”现象。拉萨小麦灌浆的平均最高气温为20—22℃，极端最高气温25℃左右，正处于小麦光合作用最适温度之中，促进了光合作用的进程。从最低温度看，北京小麦灌浆期的最低气温为13—18℃，拉萨是9—11℃，而小麦的暗呼吸是随温度的上升而增加的，高原上夜间温度低，大大减少了呼吸作用和碳水化合物的消耗，增加了干物质的积累。于是，拉萨的光合产物多于北京，即千粒重拉萨较高。但从拔节—成熟期间日较差来看，北京却大于拉萨（表3.24）。因此，在使用气温日较差时，不能仅看其绝对数值，还应特别注意高低温配合对干物质积累过程的影响。

**表3.24 各地区春小麦生育期平均日较差**

| 生育期 / 要素 / 地点 | 出苗—拔节 | | | 拔节—抽穗 | | | 抽穗—成熟 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 最高气温（℃） | 最低气温（℃） | 日较差 | 最高气温（℃） | 最低气温（℃） | 日较差 | 最高气温（℃） | 最低气温（℃） | 日较差 |
| 拉萨 | 18.8 | 4.3 | 14.5 | 22.3 | 9.2 | 13.1 | 21.1 | 9.6 | 11.5 |
| 北京 | 20.9 | 8.0 | 12.9 | 25.6 | 12.1 | 13.5 | 28.9 | 15.5 | 13.4 |

## 四、气温日变化与农产品的品质

气温日较差还对农产品的品质产生影响。在大陆性气候条件下，水果和肉质直根类作物的含糖量有所增加。新疆出产含糖最为丰富的水果（葡萄、甜瓜、西瓜等）就是一例。云南的山苍子含柠檬酸达60—80%，而浙江的只有35—50%，云南的伊兰香含香精达2.6—3.5%，比海南岛（2.45%）和国外（2—3%）都高，也是因为高原地区温度日较差大所致。

许多研究工作表明，不论是日平均气温还是积温，也不论是降水量还是相对湿度，都无法确切地表示春小麦蛋白质含量与气象条件之间的复杂关系，而在大陆性气候条件下气温日较差却是表示植物蛋白质含量的一个较好指标。据研究，春小麦蛋白质含

量与气温日较差呈显著正相关（图3.27），相关系数可达0.85。拟合经验式为：

$$B = 1.29\Delta T + 2.1 \tag{3.54}$$

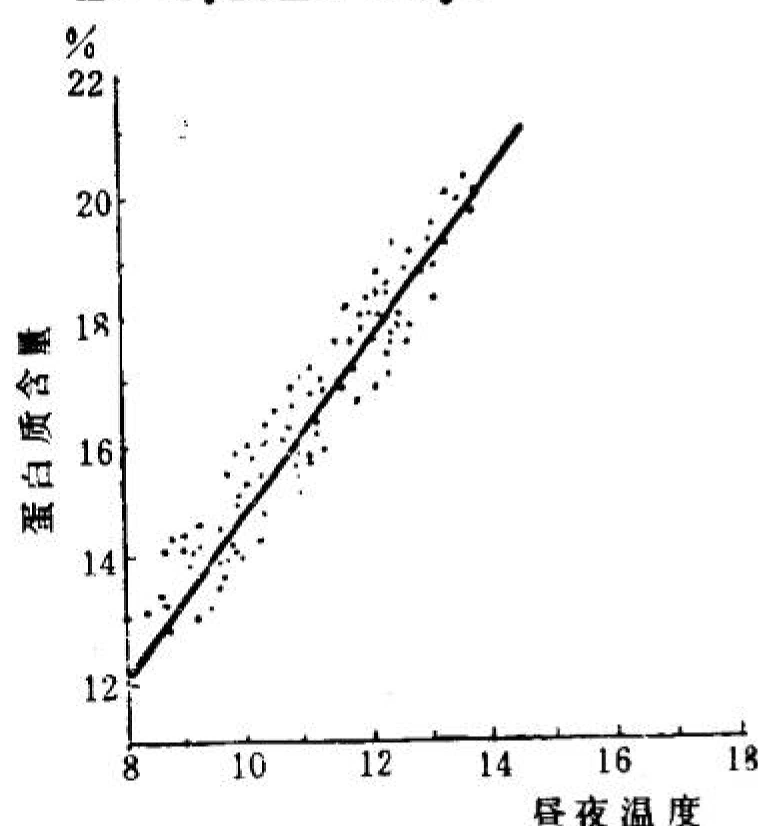



图3.27　春小麦麦粒蛋白质含量和生长期昼夜温度变幅的关系

式中，B为春小麦麦粒蛋白质含量的百分数，ΔT为气温日较差（生长期的平均值）。根据此式及气温日较差的时空分布，即可大致得出各地春小麦蛋白质含量的地理变化。但据全国杂交稻气象科研协作组（1983）的研究，生长于不同季节的作物品种，其蛋白质含量与气温日较差的关系截然不同。杂交中稻（抽穗期多在8月间），其蛋白质含量（y）与气温日较差（ΔT）呈极显著的负相关：

$$y = 15.5616 - 0.6455\Delta T$$
$$(n = 58,\ r = -0.4873^{***}) \tag{3.55}$$

杂交晚稻（抽穗期多处9、10月间），蛋白质含量呈显著的正相关：

$$y = 8.0774 + 0.3275\Delta T\ (n = 46,$$
$$r = 0.3504^{*}) \tag{3.56}$$

造成这种现象的原因被解释为抽穗期日间最高气温与夜间温度水

平影响着日较差与蛋白质的含量；而对还原糖的含量与气温日较差的关系进行分析，则得出和上述蛋白质含量与气温日较差关系相反的结论。

气温日变化还常和其它气象要素的日变化（尤其是光周期）相结合，共同对作物产生影响。一般白天温度较高时，往往有较强的光照，有利于光合作用。在光温综合影响下，适当大的气温日较差可增加白天光合积累而减少夜间呼吸消耗。

## §5　不利温度条件对农业生物的影响及其调节

除了温度的周期性变化对农业生产的影响外，温度的非周期性变化，即极端温度的出现，也会对农业生物产生不利影响，甚至减产失收。温度条件不适造成的农业气象灾害主要有温度过低和过高的危害，而且低温危害比高温危害更为常见，对农业生产的影响也更大。

### 一、温度过低对农业生物的危害

低温危害的范围很广，在我国从东到西、从南到北的广阔土地上，都有低温危害出现；危害的对象很多，几乎所有农作物在其生长发育过程中都会受到低温的影响；一些禽畜也常因低温导致疾病的发生，造成产（蛋、肉、奶及皮、毛等）量降低；危害季节则一年四季都可出现。根据出现的时间、地域及危害的作物以及低温的强度，一般可把低温危害分成冷害、寒害、霜冻和冻害四种类型。表3.25概括了我国低温危害的主要类型、危害作物及时空分布。

#### （一）冷害及其对作物的影响

冷害是指在农作物生长季节，温度在0℃以上，有时甚至在20℃左右的条件下对农作物产生的危害。发生冷害时，作物形态一般无明显变化，有“哑巴灾”之称。

冷害危害的地域广泛、危害的作物较多，且春、夏、秋季均可出现，加上作物受害表现也不相同，因而冷害的分类也就有多

表3.25 不同类型低温危害的农业天气型式、危害作物与时空分布

| 类型 | 危害地区 | 危害季节 | 农业天气型式 | 危害作物及发育期 |
|---|---|---|---|---|
| 冷害 | 东北地区<br>（主要延迟型冷害） | 春、夏、秋的作物生长季节 | 低温多雨型（湿冷型）<br>低温干旱型（干冷型）<br>低温早霜型（霜冷型）<br>低温寡照型（阴冷型） | 水稻、玉米、高粱、大豆等作物的营养生长期 |
| | 长江中下游及华南地区<br>（主要障碍型冷害） | 秋季(华南称"寒露风"，长江中下游称"翘穗头") | 干冷型<br>湿冷型<br>干风型 | 水稻孕穗期抽穗开花期 |
| | | 春季 | 持续干冷型<br>低温阴雨型 | 水稻发芽、出苗、三叶及移栽期，易造成烂秧死苗与僵苗 |
| | | 春末初夏 | 阴雨转晴型 | 早稻孕穗期 |
| | 北方地区（上两种类型） | 秋季 | | 粮食作物、棉花、果木 |

续表

| 类型 | 危害地区 | 危害季节 | 农业天气型式 | 危害作物及发育期 |
|---|---|---|---|---|
| 寒害 | 热带、亚热带南缘地区 | 越冬季节 | 平流型（阴冷型）<br>辐射型（晴冷型）<br>混合型 | 橡胶、咖啡、可可、剑麻、椰子、油棕等热带作物 |
| 霜冻 | 主要东北、华北和西北等地区 | 秋季（早霜冻） | 平流型霜冻（风霜）<br>辐射型霜冻(晴霜、静霜) | 棉花的开花、吐絮及秋收作物的灌浆成熟 |
| 霜冻 | 主要华北和西北东部等地区 | 春季（晚霜冻） | 平流辐射（混合型）霜冻<br>蒸发型霜冻 | 冬小麦拔节、棉花播种与出苗 |
| 冻害 | 北方冬麦区北部地区 | 越冬季节（包括初冬、严冬、晚冬或早春） | 冬季严寒型<br>入冬剧烈降温型<br>早春融冻型 | 冬小麦、冬油菜等越冬期与返青期 |
| 冻害 | 亚热带中北部地区 | | | 柑桔、茶树等果木的越冬 |

种。

1. 冷害类型

（1）依照农作物受害情况，可将冷害分成：

延迟型冷害　　指作物在其营养生长期（有时也包括生殖生长期）内遭遇低温，使作物生育进程减慢、延迟生育，最终秕粒增加，导致减产的现象。其特点是在较长时间内温度比较低，植株生长缓慢，抽穗、开花延迟，虽然能正常受精，但不能充分灌浆、成熟，出现水稻青米多、玉米水分多、高粱瞎眼多的现象，粒重下降而减产；也有的前期气温虽正常，抽穗并未延迟，但在抽穗后遇到异常的低温，使开花、受精、灌浆以至成熟延迟而受害。作物遭受延迟型冷害，不但产量降低，品质也有下降。东北地区的冷害多属这种类型。

障碍型冷害　　指作物在其生殖生长期（主要是生殖器官分化期到抽穗开花期），遭受短时间（一般只有几天）异常的低温，使生殖器官的生理活动受阻，造成颖花不育、籽实空粒而减产的现象。其特点是时间短、危害重。它包括孕穗期冷害和抽穗、开花期冷害，一般说，大陆性气候下多以后期为主，海洋性气候下则前、后期均有。华南地区的“寒露风”和长江中下游地区的“翘穗头”都属障碍型冷害。

混合型冷害　　指在作物生长季中相继出现或同时发生上述两种类型的冷害，即在生育前期遇低温延迟生育，在孕穗、抽穗、开花期又遇低温危害，造成不育或部分不育，产生大量空秕粒，产量锐减。

上述三种类型冷害的降温过程如图3.28所示。

间接型冷害　　或称稻瘟病型冷害，指水稻在其生长期内因低温阴雨而发生稻瘟病，使作物受害减产。

（2）依照发生地区分，可把冷害分成：

东北冷害　　即在东北地区发生的东北最主要的农业气象灾害。危害的作物有水稻、高粱、玉米、大豆等，从作物苗期（春

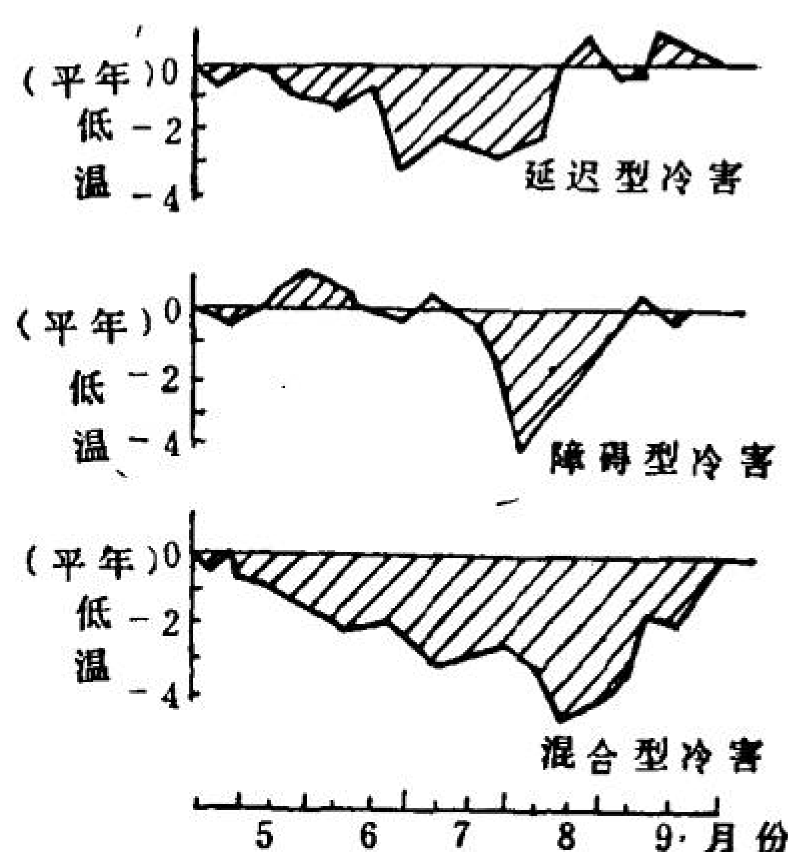



图3.28 三种冷害类型的气温过程

季）至灌浆成熟（秋季）的整个生长季内都有可能发生。危害的一般规律是，温度低、生长季短、积温年际变化大。低温年发生频率高的地区，一般冷害较重，反之，冷害较轻。在温度条件相当的情况下，喜温作物受冷害的比例大；晚熟的品种和耕作粗放的地方，冷害也较重；早熟品种比重大，而精耕细作的地方，冷害较轻。

南方冷害　南方地区发生的冷害，以障碍型冷害为主，以危害水稻（尤其是双季晚稻）为主，一般称为秋季低温，"寒露风"和"翘穗头"为地方性名称。寒露风是发生在南方寒露前后，因秋季冷空气入侵引起明显降温而使水稻减产的一种冷害。它影响到水稻开花、授粉和受精过程的正常进行，使稻谷的空粒增加。寒露风危害水稻的主要时期有幼穗分化期（抽穗前25—30天）、花粉母细胞减数分裂后的四分体期（抽穗前10—15天，对低温最敏感时期）和抽穗开花期。翘穗头为长江中下游地区因秋季低温危害双季晚稻抽穗开花出现的现象。另外，南方冷害还包

括春末夏初低温，这主要危害双季早稻的苗期生长与移栽后的返青，在倒春寒天气出现时危害尤重。

北方冷害　　指低温对华北地区的危害，延迟型和障碍型冷害均可能出现。危害的作物除粮食作物外，还包括棉花、果木等作物。

（3）依照发生的季节分，则主要有春季（春末夏初）低温、夏秋季低温和秋季低温。后两者分别表现为北方及东北地区的延迟型冷害和南方地区的障碍型冷害。春季冷害（包括倒春寒害）主要指发生于南方双季稻区，由于早春温度较低影响早稻苗期生长与返青的现象。

依照低温出现时的农业天气条件分，则又有多种分法，如对东北冷害，有低温多雨型（湿冷型，低温与多雨结合，地温低，湿度大，成熟延迟，造成贪青减产）、低温干旱型（干冷型，低温与干旱结合，对东北地区的西部和不抗干旱的大豆危害最大）、低温早霜型（霜冷型，低温与早霜冻相结合，使水稻、高粱贪青晚熟，大幅度减产）和低温寡照型（阴冷型，低温与阴雨寡照相结合，对东北地区的东部山区的水稻危害最大）。对南方冷害，有湿冷型、干冷型和干风型。对于春季低温则有持续干冷型、低温阴雨型和阴雨转晴型。

2．冷害对作物的危害

各种作物品种在其个体发育过程中都要求一定的温度条件，其生育的适温范围也不一样，若温度低于生育适温的下限温度，作物就将受到不利影响，引起体内的一系列生理变化。低温冷害的影响主要有：

（1）影响作物的生理过程　　低温削弱作物的光合作用（如当气温为24.4℃时，光合强度为100%，而在14.2℃时，降至74—79%）、降低呼吸强度（当温度从作物适温每下降10℃时，其呼吸强度将降低1.6—2.0倍），并降低对矿质营养的吸收和养分的运转，如表3.26所示。

**表3.26 低温对水稻在三个生育时期主要功能叶片内所同化的$C^{14}$向不同器官转运的影响**

**（毫克干物质/分钟）**

| 温度 | 分蘖期(6月15—17日) | | | | 幼穗分化期（7月12—14日） | | | | 乳熟期（8月1—3日） | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 新叶 | 老叶 | 根 | 供$C^{14}$的叶 | 幼穗原基 | 旗叶 | 秆 | 供$C^{14}$的叶 | 穗 | 秆 | 供$C^{14}$的叶 |
| 正常温 | 288 | 69 | 304 | 923 | 243 | 26 | 188 | 265 | 53 | 93 | 111 |
| 低温 | 72 | 61 | 171 | 1366 | 91 | 6.6 | 120 | 392 | 8.1 | 27 | 259 |
| 低/正 | 0.25 | 0.87 | 0.56 | 1.46 | 0.37 | 0.25 | 0.64 | 1.48 | 0.15 | 0.29 | 2.33 |

（石冢，1962年）

（2）引起作物的生理失调　低温使植株根系吸收的营养分配失调，不仅使根部吸收的矿质养分减少，还阻止营养向叶片转运，使叶片养分更少。叶片光合产物的分配失调，光合产物留在叶片里的时间较长，并消耗于呼吸作用，使这些物质向植株的其它部位运转量减少。

（3）限制作物的营养生长　这是造成延迟性冷害的主要原因。这包括较低的气温，尤其是低地温危害根系的发育，低温影响植株高度与出叶速度（图3.29），和低温使水稻分蘖数和有效分蘖减少。

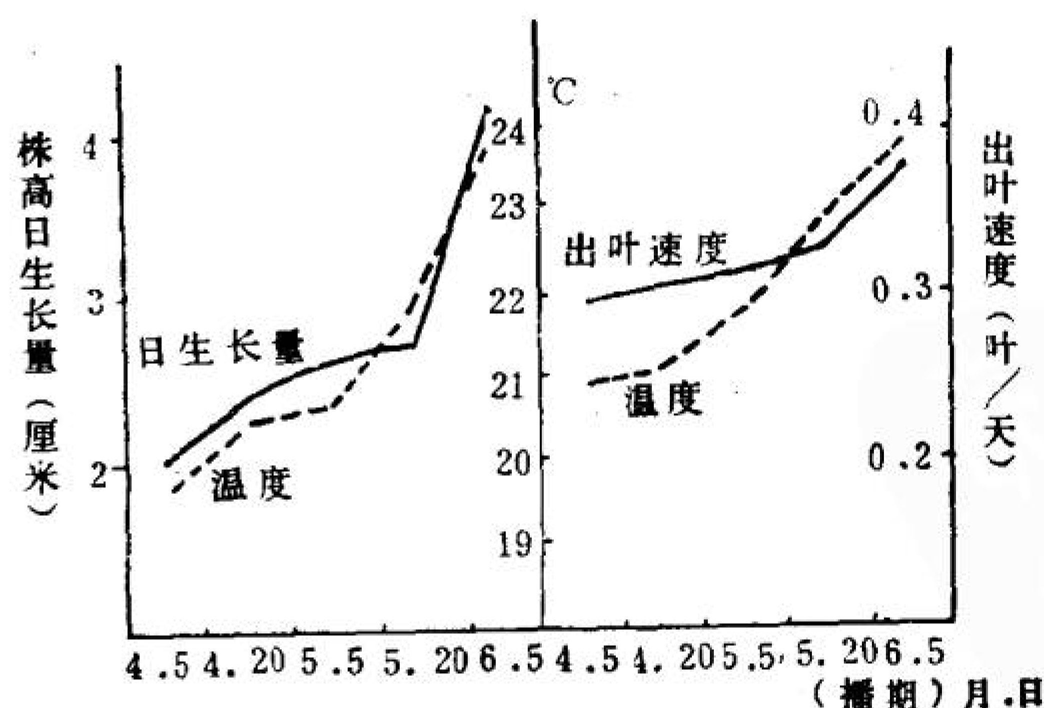



图3.29 高粱株高日增长量和出叶速度与温度的关系

（4）危害作物的生殖生长　这是造成障碍性冷害的根本原因。低温使作物授粉、受精过程受到影响，开花数减少，空粒增加。低温是造成空壳率增加的根本原因，其间关系近似二次抛物线关系。

（二）寒害及其对作物的影响

寒害是指中国热带、亚热带地区作物在冬季遭受0℃以上（有时稍低于0℃）的低温危害的现象。它是热带作物主要的农业气象灾害之一。危害的作物有橡胶、椰子、咖啡、可可、胡椒、剑麻等。主要热带作物的寒害指标（最低气温）如表3.27所示。对于不同类型寒害，指标值有所不同，同时表中的“轻微寒害”一般同阴天相结合时，才能致害。

**表3.27　几种主要热带作物的寒害指标（℃）**

| 寒害程度＼作物 | 橡胶 | 椰子 | 腰果 | 胡椒 | 咖啡 | 油棕 | 可可 | 剑麻 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 轻微寒害 | 10 | 8 | 15 | 10 | 2 | 10 | 10 | 10 |
| 严重寒害 | 2 | 2 | 4 | 3 | −1 | 2 | 5 | 0 |

1．寒害类型

依寒害发生时的农业天气条件，一般可将寒害分成：

平流型寒害　指平流型降温引起的寒害。其特点是降温开始时，每日的最高、最低及平均气温值同时下降，天气转阴，有时伴有小雨，降温初期伴有风（2—3米/秒），日较差较小（≤5℃），最低气温不很低（5℃左右），平均气温在10℃以下，最初2，3天或数日内降温量很大，往往可达10—15℃，甚至更大，持续5—15天或更长。对橡胶树的危害主要是使树冠、树干、树皮受害，自上而下发展以至全株。这是我国东部季风区（广东、广西、福建、云南地区）的主要受害类型。平流型寒害有两个亚型，即短期风寒型与长期阴冷型。前者发生时，日平均温度较低（10℃以下，有时甚至在5℃以下）、风速较大（2—

3米/秒以上），阴冷期一般在10—15天以下，其危害的主要因子是日平均温度和风速；后者发生时，日平均温度不太低，通常5—12℃，风速也不大，但阴冷持久（达1个月或更长时间），故月平均温度较低。比较起来，后者的危害比前者为重。

辐射型寒害　　指辐射降温引起的寒害。其特点是天气晴朗，气温日较差大，最低温度可降至2℃甚至0℃以下，但低温持续时间短，有时地面有霜出现。这类寒害主要是作物基部受害，由下而上影响全株。它也有两种亚型，即急发性寒害和累积性寒害。前者也称为急发性霜害，多发生在两广地区，最低温度在2℃以下（叶面及株皮温度常在0℃以下），发生霜冻天气，次日早上日光直射，气温急剧上升，发生危害；后者发生时，最低温度在5℃以下，气温日较差10—15℃，上午有辐射雾出现，或局部环境荫蔽，白天日照少，升温缓慢，短时间一般看不出受害症状，持续1—2周或更长时间，则发生“烂脚”现象，它是西部季风区（滇西、滇南）的主要受害类型。

混合型寒害　　即上述两种寒害相继出现，平流降温之后，天气转晴，发生辐射降温，此类型寒害危害最为严重。

2. 寒害对作物的危害

主要是在寒害发生时，ATP减少，酶的系统紊乱、活性降低，导致植物的光合、呼吸、水分吸收、蒸腾及物质运输、转移等生理活性降低，彼此之间的协调关系破坏，造成作物受害。如金鸡纳，当温度从25℃降到5℃时，过氧化氢酶的活性降低28倍，而氧化酶的活性降低14倍，两者的协调关系被破坏，而使过氧化氢积累起来引起植物中毒。低温条件下，由于蛋白质代谢紊乱，分解酶活性增强，合成酶活性减弱，使蛋白质减少，氨基酸和氨量增加，破坏了蛋白质代谢的协调关系。同时，在低温条件下，蒸腾作用大于呼吸作用，使光合作用大幅度降低，但呼吸作用却相应有所增加，大量消耗贮藏物质，破坏了水分代谢与物质代谢的平衡。

（三）霜冻及其对作物的影响

霜冻是指在春秋转换季节，土壤表面和植物表面温度下降到（0℃以下）足以使植物遭受伤害甚至死亡的一种农业气象灾害。它与气象学中霜的概念不同，前者与作物受害联系在一起，后者为近地气层温度降到0℃以下水汽凝华的一种现象，它主要决定于温度的高低和空气湿度的大小，其本身对作物没有直接影响。无霜（白霜）出现的霜冻，常称为黑霜。

1. 霜冻的类型

（1）根据发生的季节，主要分为两种：

春霜冻　又称晚霜冻，指春播作物苗期、果实花期、越冬作物返青后发生的霜冻，春季最晚的一次霜冻称为终霜冻。随着春季温度的提高，晚霜冻发生的频率逐渐降低，强度也减弱，但是发生的越晚，对作物的危害越大。

秋霜冻　又称早霜冻，指秋收作物尚未成熟、露地蔬菜还未收获时发生的霜冻，秋季最早一次霜冻称为初霜冻。一般初霜冻越早，危害越重。随着秋季温度的逐渐降低，秋霜冻发生的频率逐渐提高，强度也加大。

还有人将前述强度较大的寒害称为冬季霜冻。

（2）依霜冻的成因来分，可分为四类：

平流型霜冻　指强冷平流引起剧烈降温，使作物受害的霜冻。发生时常伴有强风，故又称为“风霜”。其特点是危害范围广、时间长（一般3—4天），地区间差异较小。多发生在初春和晚秋。

辐射型霜冻　指在冷高压控制下，夜间晴朗无风，植物表面强烈辐射降温而发生的霜冻，又称为“静霜”或“晴霜”。凡是影响辐射冷却的因子都将影响其强度。其特点是持续时间短（一般几个小时，有时也可能连续在几个晚上出现）、危害地区小，地区间差异较大，不同地块、甚至同一植株的不同部位，也会因辐射失热的不同，造成霜冻强度的差异。

平流辐射型霜冻　也称混合型霜冻，指冷平流和辐射冷却共同作用下发生的霜冻。通常是先有冷空气侵入，温度明显下降，到夜间天空转晴，地面有效辐射很强，植株体温进一步降低而发生霜冻。此种霜冻发生次数最多，影响范围大，危害也最重。

蒸发霜冻　指由于空气变干或植被、土壤表面水分蒸发迅速，植物体耗热较多，株体冷却，而使作物受害的一种霜冻。这类霜冻相对较少，且多发生于干旱地区降雨之后。其强度主要取决于空气温度、大气湿润状况等。

上述四类霜冻的区别及对作物的危害程度如表3.28所示。

**表3.28　各种类型霜冻的综合比较**

| 霜冻类型 | 出现季节与时间 | 持续时间 | 农田小气候特点 | 危害范围 | 对农作物危害程度 |
|---|---|---|---|---|---|
| 平流型霜冻 | 早春晚秋日夜均可 | 可连续几天 | 不显著 | 广大地区 | 稍重 |
| 辐射型霜冻 | 早春晚秋的夜晚至清晨 | 每次4—6小时，可连续几个夜晚 | 显著 | 局部地区 | 轻 |
| 混合型霜冻 | 早春晚秋的夜晚 | 每次几小时，可连续1—2个夜晚 | 较显著 | 广大地区 | 严重 |
| 蒸发霜冻 | 早春晚秋的夜晚 | 不定 | 较显著 | 局部地区 | 较轻，不常见 |

2. 霜冻发生的一般规律

除了天气条件以外，地形条件是影响霜冻强度最主要的因子。山的北坡迎冷风、少阳光，霜冻重；南坡背风向阳，霜冻轻；东坡和东南坡早晨首先照到阳光，植株体温变化剧烈，霜冻害往往较重。山坡冷空气能沿坡下流，霜冻轻；山下谷地及洼地冷空气堆积，霜冻重；冷空气易流进而又难排出的地形、地势条件下霜冻重；冷空气难进而又易排出的地形霜冻就轻。靠近水体的地方，霜冻较轻。疏松的土壤，热容量小、导热率低，使贴地层

温度迅速下降；霜冻重；紧实潮湿的土壤则霜冻轻。表3.29为不同地形条件下霜冻危害情况。

**表3.29 不同地形的霜冻危害程度**

| 地　形 | 冷空气径流特征 | 霜冻危害程度 | 霜冻温度较平原 |
|---|---|---|---|
| 山顶和斜坡的上部 | 流　出 | 最　轻 | ＋2℃左右 |
| 平原及平坦山顶 | 没有流出 | 中　等 | 0 |
| 宽阔平坦的谷地，丘陵中谷地 | 微弱的流入 | 中等以上 | −1.5—−2.0℃ |
| 窄而弯的谷地，山间谷地 | 流入大于流出 | 重 | −2.0—−3.0℃ |
| 盆地（凹地） | 只有流入 | 最　重 | −3.0—−4.5℃ |

另外，林中空地的辐射霜冻强弱主要取决于空地面积，一般若空地直径在四周林体高度3—20倍，林带又郁闭，辐射型霜冻最严重，这样的林中空地称为"霜穴"。

3．霜冻危害的作物

受霜冻危害的作物主要有小麦、棉花、水稻、果树、蔬菜及玉米、大豆等。表3.30为几种主要农作物和果树霜冻害的温度指标。指标值因天气背景、作物品种抗寒性及农业技术措施的不同而有一定的变幅。

霜冻危害作物的生理机制是：（1）温度下降到0℃以下时，产生细胞间隙结冰，原生质与液泡逐渐脱水，冰晶不断扩大，对细胞壁产生机械压力，超过一定限度时，原生质就会发生不可逆的凝固，使细胞致死。（2）温度再继续下降，出现胞内结冰，引起原生质凝固死亡。（3）解冻时温度上升太快，胞间冰融化并很快蒸发，原生质因失水使植物干死。在一次降温过程中作物是否受害及受害程度决定于作物的耐寒性、降温的速度、低温强度及解冻时的升温快慢。（4）还有人认为，发生霜冻的一个主要原因是ATP合成受阻，细胞结构发生病理变异。低温条件下

表3.30 几种主要农作物和果树的霜冻害温度指标

| 作物名称 | 生育期 | 最低温度(℃) | | | 受害情况 |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 气温 | 叶温 | 地面温度 | |
| 早稻 | 秧苗期 | 6—8<br>＜6 | | | 产生死亡<br>死苗严重 |
| 晚稻 | 乳熟期 | ＜8 | | | 开始受害，影响严重 |
| 冬小麦 | 越冬期 | | | 分蘖节处地温<br>-15—-14<br>-19—-16<br>＜-20 | 麦苗开始死亡<br>大量死亡<br>全部死亡 |
| | 拔节后 1—5天<br>6—10天<br>11—15天<br>16天以上 | -2.0—-0.5<br>-0.5—0.5<br>0.5—1.0<br>1.0 | -5.5—-4.0<br>-4.0—-3.5<br>-3.5—-3.0<br>-3.0 | | 轻霜冻害 |
| | 拔节后 1—5天<br>6—10天<br>11—15天<br>16天以上 | -5.0—-3.0<br>-3.0—-1.5<br>-1.5—-0.5<br>0.0 | -9.0～-7.0<br>-6.5—-5.5<br>-5.5—-4.5<br>-4.0 | | 重霜冻害 |
| 棉花 | 出苗7天内 | 4.0<br>3.0 | | -0.5—0.5<br>-1.5—-0.5 | 叶子轻微受冻<br>受冻严重，死亡50% |

续表

| 作物名称 | 生育期 | 最低温度(℃) | | | 受害情况 |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 气温 | 叶温 | 地面温度 | |
| 棉花 | 出苗7天后 | 2.0—3.0<br>2.0 | | -2.0—-1.0<br><-2.0 | 叶子轻微受冻<br>受冻严重，死亡50% |
| | 吐絮成熟期 | 1.0—3.0<br>-1.0—1.0 | -2.0—-1.0<br><-3.0 | -1.0—1.0<br>-3.0—-1.0 | 部分叶片受害<br>叶子枯干脱落，棉铃受害，部分棉株死亡 |
| | 出苗期<br>成熟期 | -3.0—-2.0<br>-3.0—-2.0 | -5.0—-4.0 | -3.0—-2.0 | 开始受伤和部分植株死亡 |
| | 出苗期<br>成熟期 | <-3.0<br><-3.0 | | | 大多数植株死亡 |
| 谷子 | 苗期 | -2.0—0.0 | -5.0—-4.0 | | 部分死亡 |
| 高粱 | 苗期 | 0.0—-1.0<br>-2.0—-1.0<br>-3.0 | -4.0—-3.0<br>-5.0—-4.0 | | 开始受冻<br>部分死亡<br>大多数植株死亡 |
| | 成熟期 | 0.0—2.0<br>-2.0—0.0<br>-3.0 | | | 叶片受冻<br>部分死亡<br>大多数植株死亡 |

续表

| 作物名称 | 生育期 | 最低温度(℃) | | | 受害情况 |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 气温 | 叶温 | 地面温度 | |
| 大豆 | 苗期 | −4.0—−3.0 | | | 开始受冻和部分死亡 |
| | | <−4.0 | | | 大多数植株死亡 |
| | 成熟期 | −3.0—−2.0 | | | 开始受伤和部分死亡 |
| | | <−3.0 | | | 大多数植株死亡 |
| 花生 | 苗期 | −0.5 | | | 开始受伤和部分死亡 |
| | | −1.0 | | | 大多数植株死亡 |
| 马铃薯 | 苗期 | −2.0 | | | 开始受冻和部分死亡 |
| | | <−2.0 | | | 大多数植株死亡 |
| | 成熟期 | −2.0—−1.0 | | | 开始受伤和部分死亡 |
| | | −3.0 | | | 大多数植株死亡 |
| 苹果 梨 李 樱桃 | 开花期 | −2.0—−1.0 | | | 开始受冻 |
| 葡萄 | 开花期 | 0℃左右 | | | 开始受冻 |
| 桃 | 开花期 | 0℃左右 | | | 开始受冻 |

植株体内出现铵的累积，也危害作物的生理机能。

（四）冻害及其对作物的影响

冻害是指越冬作物和果木在越冬期间由于0℃以下低温或剧烈变温所造成的一种农业气象灾害。在北方，主要危害越冬作物，如冬小麦、冬油菜和越冬叶菜类等；在南方，尤其是亚热带北缘地区，主要危害经济果木，如柑桔、茶叶等。另外，我国温带地区的落叶类果树及其某些宿根饲料和牧草等也有冻害发生。

1. 冻害的类型

冻害的类型主要依冻害发生时的天气条件而定，如对冬小麦，一般分为三种类型：

冬季严寒型　指冬季有2个月以上平均气温比常年偏低2℃以上，北方广大无积雪麦田及积雪不稳定地区发生的冻害，若冬前积温少，秋、冬土壤干旱时，麦苗长势弱，则冻害严重。

入冬剧烈降温型　指麦苗停止生长前后，因气温骤然大幅度下降而发生的冻害。另外，若播种过早或前期气温偏高，生长过旺，再遇冷空气更易使冬小麦受害。

早春融冻型　早春回暖解冻，麦苗开始萌动，抗寒力下降，若遇较强冷空气可使麦苗受害。

按冻害发生的时期，可分为初冬冻害、严冬冻害和晚冬（或初春）冻害。冬至以前发生的为初冬冻害，冬至到大寒发生的为严冬冻害，大寒以后发生的为晚冬或初春冻害。从发生频率看，严冬冻害最多，但从对农业生产危害情况看，则以初冬和晚冬冻害为重。

2. 冻害对作物的危害

这主要与冬季低温强度、低温持续时间及作物的越冬性和抗寒性有关。一般低温强度越强、持续时间越长、越冬性及抗寒性越弱，冻害就越严重。所谓越冬性是指农作物在越冬期间对冻害和其他不良气象条件（如干旱、风抽、冰害、雪害等）的忍耐和抵抗能力的总称。抗寒性则仅指作物在越冬期间抵抗低温冻害的

能力。作物抗寒性是其越冬性的最主要的组成部分。

作物抗寒性的形成取决于其生理特性、气象条件及冬前适当的锻炼。提高作物的抗寒性，要避免细胞原生质脱水，方法是增加细胞中可溶性糖的含量，糖作为一种保护物质，可阻止原生质胶体的凝固和破坏，同时，糖的增加还使细胞液的浓度提高，使细胞液的冰点降低。另外，作物抗寒性的提高，还必须增加细胞的结合水、减少自由水，即增加细胞胶体的水分保持力，使作物对低温等不良条件的侵袭变为不敏感。

光、温、水等气象条件对作物抗寒性形成的影响，也正是通过影响糖分的积累、细胞胶体物质的增加等完成的。

（1）温度条件的影响　温度对抗寒性影响的一般规律是，温度降低时抗寒性升高，温度升高时抗寒性降低。随着温度的降低，作物的各生理过程（除春化作用外）都趋于减弱，当温度低至一定程度时，细胞就被迫转入休眠状态，从而提高了作物的抗寒性与对其它不良条件的抵抗能力。同时，温度降低时，引起作物体内一些机能和结构上的变化，如株体内淀粉转化为糖，糖分的积累使抗寒性提高。另外，低温条件限制植物的生长，也使其抗寒力明显提高。

（2）光照条件的影响　一般光合作用强、光照中直射光成份大、日照长度缩短，都利于作物抗寒性的形成。因为光合作用强，积累的营养物质多，为增强作物的抗寒性奠定了物质基础；强烈的直射光能阻滞作物细胞组织分化，使细胞很小，并具有粗厚的细胞壁，其保护物质发展得更加角质化和木质化，利于形成抗寒性；缩短日照时间的作用与强直射的作用相同，如缩短秋季昼长，在短日照下，几乎所有越冬作物都停止生长，并加强细胞的分化，增强抗寒性。

（3）水分条件的影响　秋季适宜的土壤水分有利于抗寒能力的提高。水分过多易引起作物徒长，降低抗寒性。但若植株生长弱，长时间的土壤干旱易导致作物脱水萎蔫，也不利于抗寒

性的形成。一般当作物生长过旺时，适当的水分不足是有利的。

另外，广义的作物越冬冻害还应包括土壤掀耸（冻拔）、冰壳害（冰害）和冻涝害等。

低温还对畜牧业有严重的危害，如秋、冬、春大强度的降温将严重影响家畜的生育，有时是毁灭性的打击。

**二、温度过高对农业生物的危害**

温度过高的危害，即高温危害，与低温危害相比，其程度要轻，范围也小。一般意义上的高温危害，指农业生物因高温出现，超过其生长发育甚至生命活动的上限温度而导致伤害的一种农业气象灾害。如水稻的高温不实与高温逼熟，在通风不良的温室栽培的作物的高温害，果树的日烧等，又称热害。另外，越冬作物在越冬季节里，冬季温暖，就会生长发育一阵子，以后若遇到低温，往往会发生障碍，这也是一种高温害，常称为暖冬害。高温危害对养殖业的发展也有很大影响，据研究，奶牛热害是限制我国奶牛产量的最重要因子之一，高温条件下，家畜采食量、饲料转化率都明显降低。

高温不实是指高温影响作物的受精过程形成空粒的现象。如水稻开花期遇高温（35℃以上），开花时间提早、开花量减少、花药开裂率下降、闭花率增加（表3.31）。同时高温能伤害雄性器官，使花粉在柱头上不能发育或发芽率降低，空壳率增加。

高温逼熟是高温天气对成熟期作物产生的危害，华北地区的

**表3.31　不同高温对水稻开花的影响**

| 温　度(℃) | 30 | 32 | 35 | 38 |
|---|---|---|---|---|
| 日开花高峰时间 | 11:00 | 9—11:00 | 9:00 | 7:00 |
| 最大开花高峰的开花率% | 19.6 | 6.4 | 4.3 | 2.3 |
| 总开花率% | 75.1 | 37.4 | 19.5 | 20.9 |
| 花药开裂率% | 88.8 | 83.6 | 83.1 | 41.6 |
| 夜开花率% | 2.4 | 7.5 | 8.4 | 7.5 |
| 闭花率% | 4.4 | 29.8 | 64.4 | 71.1 |

小麦、马铃薯，长江流域以南的水稻、小麦，北方和长江中下游地区的棉花常受其害。如水稻在开花后7—16天灌浆速度最快，积累干物质最多，占籽粒重的85%左右。如果此时遇到高温，将造成根系早衰，叶片功能下降，叶绿素含量降低，缩短了光合产物的接纳期，使成熟期缩短，灌浆不足，千粒重下降，同时却增加了植株呼吸强度，消耗较多的有机物质，减少干物质的积累，叶温增高，蒸腾增强，作物失水严重，破坏了体内的水分代谢平衡，削弱了籽粒灌浆能力，促使籽粒尚未饱满时就很快成熟瘪粒，形成高温逼熟危害。

高温危害作物的原因在于，高温使植株叶绿素失去活性，阻滞光合作用的暗反应，破坏光合作用和呼吸作用的平衡，降低光合效率，消耗大大增强；促进蒸腾作用，破坏水分平衡；使细胞内蛋白质凝聚变性，细胞膜半透性丧失，导致有害代谢产物的积累（如蛋白质分解时氨的积累），植株中毒，作物的器官组织受到损伤；高温还使光合同化物输送到穗和粒的能力下降，酶的活性降低，致使灌浆期缩短，籽粒不饱满，产量下降。

### 三、近地气层温度与土壤温度的调节

土壤温度及近地气层温度的变化取决于它们对热量的收支情况，其热量收支可用热量平衡方程表示：

$$R_0 = Q_s + P + C + LE \qquad (3.57)$$

式中，$R_0$是作用面的热量收支；$Q_s$是作用面和土壤下层热量交换，P是作用面与空气层的热量交换；C是冷空气平流的冷却作用或其他加热作用、空气垂直混合所增加的热量等；LE是水分蒸发和植物蒸腾所消耗的热量或水汽凝结所释放的热量。决定$R_0$大小的是辐射收支状况，即辐射平衡方程：

$$R = (S + D)(1 - \alpha) - F \qquad (3.58)$$

式中，R表示辐射平衡；S为太阳直接辐射；D为散射辐射；$\alpha$为作用面对短波辐射的反射率；F为有效辐射。

可以看出，任一分量的变动都会引起热量平衡方程的变动，

导致土壤温度和近地气层温度的变动。调节和控制田间热状况的根本途径，便是从调节和控制上述方程各个分量着手，采取相应的措施，亦即通过为增大受辐射面、减小反射、减小有效辐射、增加土层热量传输能力所采取的相应措施等，以期达到预期增温的目的。现在结合农业生产实际，扼要介绍几种常用调节措施的依据与效果。

（一）覆盖的作用及其利用

在目前条件下，利用覆盖改变地面反射或吸收能力是完全可以办到的。如春季苗床上撒草木灰、有机肥料或其他深色覆盖物，能提高土壤对太阳辐射的吸收率，达到苗床增温的目的。江苏建湖气象站于1976年利用土面增温剂和其他覆盖物育秧，对比分析表明，除了用苕子覆盖效应不显著外，在不同天气条件下，各种覆盖物都有增温效应，而苕子覆盖对于遇有大雨避免冲翻种子却是一种有效的方法（表3.32）。

**表3.32 覆盖物的温度效应和苗情**

| 项目 | 地面温度(℃) | | | 地中3cm温度(℃) | | | 考苗结果 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 晴 | 多云 | 阴 | 晴 | 多云 | 阴 | 出苗率(%) | 苗高(cm) | 叶片数 | 根数 | 10株鲜重(克) | 10株干重(克) |
| 用剂地 | 21.7 | 20.5 | 16.6 | 21.6 | 19.8 | 16.5 | 74.9 | 12.4 | 4叶1心 | 6.0 | 1.30 | 0.38 |
| 糠灰覆盖 | 19.8 | 18.5 | 15.0 | 18.4 | 17.4 | 14.6 | 72.0 | 11.6 | 4叶 | 5.0 | 1.90 | 0.39 |
| "5406"覆盖 | 19.7 | 18.2 | 14.5 | 17.9 | 17.3 | 14.5 | 71.4 | 11.7 | 3叶1心 | 5.0 | 1.80 | 0.40 |
| 苕子覆盖 | 17.6 | 16.2 | 14.1 | 17.3 | 16.1 | 14.3 | 71.4 | 9.0 | 4叶 | 6.0 | 1.12 | 0.21 |
| 对照 | 19.1 | 18.0 | 14.3 | 17.4 | 17.2 | 14.6 | 66.7 | 9.4 | 3叶 | 4.2 | 1.10 | 0.22 |

覆盖物的颜色不同，增温效应不同。黑色覆盖物吸收能力强，反射率低，增温效果好；白色覆盖物则相反（表3.33）。

用塑料薄膜覆盖，能更有效地增温，形成特定的良好的小气候环境。目前大面积使用塑料薄膜育秧，取得了良好效果。薄膜能透过太阳短波辐射，防止或削弱地面的长波辐射，起到"花房"效应。同时阻隔水汽向外扩散，蒸发受到抑制，膜内风速为

表3.33 地面覆盖物不同对5厘米土温的影响

| 项 目 | 与无覆盖物地段的温度差异(℃) | | |
| --- | --- | --- | --- |
| | 黑色覆盖物 | 白色覆盖物 | 乙炔纤维素层 |
| 日平均温度 | 1.1 | 0.5 | 6.7 |
| 最低温度 | 1.3 | 0.8 | 5.3 |
| 最高温度 | 0.9 | −0.9 | 8.4 |

0，湿度高。

近年来，许多地区使用土面增温、染色剂等，也收到了很好的效果。风障、积雪覆盖等也有增温效应，常为生产实践中所应用。

（二）灌溉的作用及其利用

我国农民利用灌溉改变农田热量状况已有悠久历史。农田经灌溉后能使反射率减小，地面温度下降，空气温度增加，导致有效辐射减小，辐射平衡增加；另一方面，由于水的热容量远大于空气热容量，灌溉后，土壤含水量增加、空气含量减少而使土壤热容量增加，保温效果较好。因此在夏季灌溉可以降温、冬季灌溉可以增温，且温度日变化也较小。据在山西忻县的试验，越冬小麦田浇水后三天内，可使地面温度增加1.7—2.3℃，地中5厘米深度地温增加2.3—3.4℃。当然，灌水调温的效果和水温的关系很大。早春冷水灌溉对农田不利，生产上常采用迂回水道，以提高水温，之后再灌到田里。秋季低温危害水稻抽穗开花，此时江苏南部地区河水温度高于田间温度，利用河水灌溉稻田，提高土温和近地气层温度，能减轻水稻受害程度。

近年来大城市郊区喷灌发展迅速。喷灌对调节气温和空气湿度的作用较大，特别是用于防高温干旱的效果较好。江苏镇江农业气象研究所曾对利用喷灌防止夏季高温对茶树伤害进行了研究。喷灌的效果与天气条件有关。喷灌对气温的影响如图3.30所示。

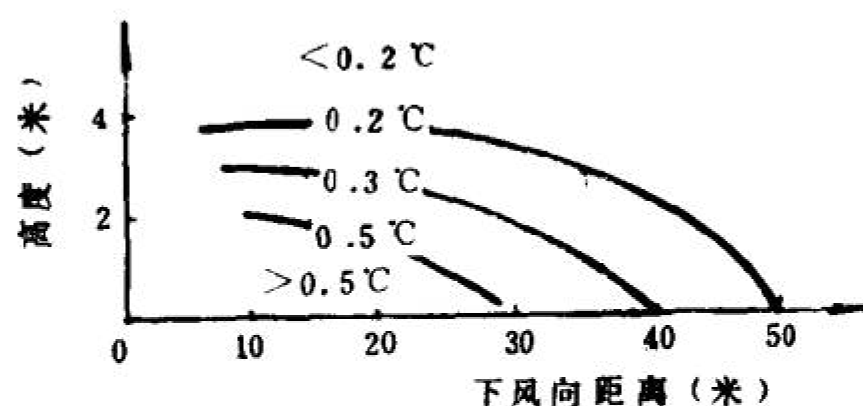



图3.30　喷灌后下风向气温下降剖面图

（三）加热的作用及其利用

对空气加热主要是燃烧和吹风。

燃烧足够量的物质，在一定条件下、一定范围内可改变近地气层的热量平衡，达到增温的目的。一般认为，燃烧主要有四个方面的作用：（1）熏烟产生的烟幕削弱了下垫面的有效辐射；（2）水汽在烟幕中的吸湿性粒子上凝结产生潜热；（3）类似"鼓风机"的作用，在果园中由于燃烧产生的热空气上升并与树冠上层稍暖空气混合而在被保护的树冠中下沉。（4）物质燃烧时产生热量而使周围空气升温。据近年的研究，此为防御低温霜冻的重要热源。燃烧法的升温效果首先取决于燃烧器和燃烧的热效率以及热源的密度。但即使这些条件相同，试验结果也会因试验时的气象条件不同（如风速、湍流强度、稳定度等）和燃烧面积大小的不同而有很大的差别。

用鼓风机吹风，使上下空气混合，下层气温升高，从而能保护作物不受霜冻危害。使用这种方法时，只要从鼓风机出来的能量是均匀的，则升温效果与当时气层上下的温度差有关，即与逆温强度有关，随逆温强度的增大而增大。

（四）农业技术措施的作用及其利用

结合农业生产上的需要，采取相应的农业技术措施，可以改变影响土壤热物理特性的因子，从而改变土层的热量交换，提高土壤温度。常用的方法有镇压、中耕、锄地、垄作等。

镇压：其作用是增加土壤热容量，减少土壤孔隙，使土壤上

层水分增加，结果使热容量、导热率都有增加。根据南京农业大学的测定，镇压后可使土壤上层土壤热容量增大11—14%，导热率增加80—260%。土壤镇压后，土壤热量传递较快，使白天高温时段土表热量向下输送，夜晚降温时下层热量向上输送的过程加速，结果土壤温度的日变化减小，也提高夜间低温时的土壤温度。

中耕：早春时作物正是苗期，中耕后上层土壤疏松，接受太阳辐射的面增大，提高上层土壤温度。晴天表层日平均温度增高1－2℃，最高温度可提高3℃以上。中耕后切断了土壤上层的毛细管，土壤下层水分不能沿毛细管上升而蒸发，起到保墒作用，蒸发少，热量消耗也少，又能起到保温作用。

锄地：锄松土壤既增加接受太阳辐射的面积，又使锄松的表层土中空气含量增加，结果使土壤热容量和导热率降低，这样得到同样的热量，却增温明显，同时传给下层的热量少，白天热量积聚于松土层，表土层增温。锄松土壤，切断毛细管，减少蒸发耗热，如果土壤很潮湿，就起不到预期的效果，所以锄地的方法和时机很重要。

垄作：垄作可增加土壤对太阳辐射的吸收面积，约提高20—25%；垄背的反射率较低（比平地低3%），有利于土壤温度的提高。据黑龙江省的试验，垄作地温自早晨7时起开始高于平作，15时高4℃左右，15时以后垄作和平作的土壤温度都开始下降，垄作降温快，但全天18个小时内垄作地土温高于平作，而平作只是夜间6个小时土温高一些。垄作的增温效应在作物长大封垄后消失。另外，垄作的效果与纬度及垄作方向有关，高纬度比低纬度效果明显。特别在春播季节，垄作的增温效应影响较大。一般以南北向垄作较好，当太阳在东、西方时，太阳光线垂直于南北垄，有利于增温。

内岛于1964年曾对改善地面附近温度情况提出各种物理方法，现列为表3.34可参考。

**表3.34 地面附近温度改善的物理方法**

| | | | |
|---|---|---|---|
| 地面附近温度状况的改善 | 对净辐射的作用 | 反射率的变化 | 1. 调节土壤表面的反射率 |
| | | | 2. 借土壤水分的变化来调节反射率 |
| | | 长波有效辐射的变化 | 使用对短波、长波辐射有选择吸收性能的烟幕和薄膜 |
| | 对土壤热力学性质的作用 | 改变热传导率和热容量 | 1. 调节土壤水分 |
| | | | 2. 用客土法调节热的性质 |
| | | | 3. 借耕地改变土壤性质 |
| | 对气层扩散性质的作用 | 减少风速和风的湍流程度 | 1. 用防风林和垣墙减低风速 |
| | | | 2. 用维尼纶与外界的风隔离开 |
| | | | 3. 用覆盖和畦背减低地面附近的风速 |
| | 对地面蒸发的作用 | 改变蒸发速度 | 1. 用维尼纶覆盖 |
| | | | 2. 使用蒸发抑制剂 |
| | | | 3. 用灌溉调节土壤水分 |

# 参 考 文 献

〔1〕北京农业大学农业气象专业编，农业气象学，科学出版社，(1982)。

〔2〕户刈义次主编，作物的光合作用与物质生产（薛德榕译），科学出版社，(1979)。

〔3〕牛文元编著，农业自然条件分析，农业出版社，(1981)。

〔4〕J.L.蒙蒂思主编，植被与大气——原理（卢其尧等译），农业出版社，(1985)。

〔5〕云南大学生物系编，植物生态学，人民教育出版社，(1980)。

〔6〕水稻光温生态研究协作组，中国水稻品种的光温生态，科学出版社，(1978)。

〔7〕刘仲桂，水库水温与水稻丰产栽培，水利电力出版社，(1985)。

〔8〕陶炳炎等编著，杂交水稻与气象，江苏科技出版社，(1983)。

〔9〕潘铁夫等编著，农作物低温冷害及其防御，农业出版社，(1983)。

〔10〕郑大玮等编著，冬小麦冻害及其防御，气象出版社，(1985)。

〔11〕坪井八十二等编，新编农业气象手册（侯宏森等译），农业出版社，(1985)。

〔12〕廖宗族，雅鲁藏布江流域地温变化与春麦种植上限的关系，农业气象，3(4)，(1982)。

〔13〕A.J.库柏，根温与植物生长，作物气象生态译丛，农业出版社，(1984)。

〔14〕Paw U.K.T.,A Theoretical Basis for the Leaf Equivalence Point Temperature,Agri. Meteo.,30（4），(1984).

〔15〕Chang Jenhu,Climate and Agriculture,An Ecologic Survey,Aldine, Chicago, (1968).

〔16〕Tet suya,H.and Peijiro,I.,Leaf Temperature in Relation to Meteorological Factor, (2)Leaf Temperature Variation With Air Temperature and Humidity,（日）農業気象，38（3），(1982).

〔17〕卫林等，农田叶面温度计算方法的研究，农业气象，2（4），(1981)。

〔18〕程德瑜，论危害作物的高温和低温指标——危害积温，农业气象，5（3），(1984)。

〔19〕龙国炳，论水稻所需积温是非确定量及高温的抑制作用，农业气象，1（3），(1980)。

〔20〕全国杂交稻气象科研协作组，温度对杂交水稻发育速度的影响，农业气象科学，(1)，(1981)。

〔21〕朱伯伦，浅谈积温的订正，农业气象科学，2（2），(1982)。

〔22〕沈国权，当量积温及其应用，气象，（7），(1981)。

〔23〕邓根云等，小麦分蘖的数学模式及其在栽培和农业气象中的应用，农业气象，2（4），（1981）。
〔24〕余优森，日温周期特征及其对产量品质的影响，农业气象，7（1），（1986）。
〔25〕全国杂交稻气象科研协作组，籼型杂交稻气候生产力与区域分布特征的研究，杂交水稻气候适应性研究文集，气象出版社，（1985）。

# 第四章　水分与农业生产

水分对农业生产具有十分重要的意义，它是农业生物体生长、发育与产量形成不可缺少的要素，与其他要素比，其需要量又是很大的；它是农业气象学研究的重要对象之一。研究环境中的水分问题，还与其他学科，如气象学、农学、土壤学、植物学及微生物学等发生着密切的联系。

## §1　水的农业意义

### 一、水的基本性质及其生物学意义

水分子的极性　　水分子的两个氢原子以105°角度连结在一个氧原子上，近似于四面体分配。但四面体所成的角度是199°，所以整个水分子中静电荷是不平衡的。分别在一端带有负电荷，另一端是正电荷，形成极性（图4.1）。这又使得水分子对其邻近的分子具有一定的吸力，定量地排列在一起，特别是冰晶，变得有一定规律的形状。

水分子相互吸引、串联起来，从根部升高到叶的顶部，单靠毛管力、扩散压力而没有水分子的极性是连接不起来的。水分子的极性，使得水易吸附在固体表面。使离子和胶体水化，在土壤的细小孔隙中形成毛管水而使水分贮存在土壤中。

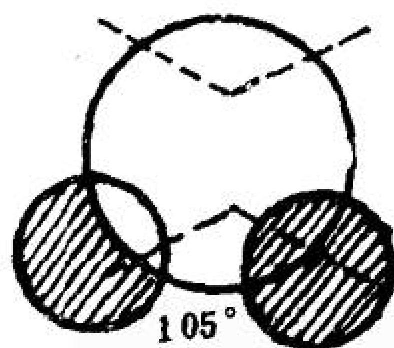



图4.1　水分子结构

热容量　　水的热容量大，在所有的固体和液体中最高，因而温度的变化缓和，滞后性大。农业中常利用这个特性来改变土壤的热传导特性和土壤温度。

汽化热　　水的汽化热在所有液体中也是最高的。水分子在

相变时携带很多热量，在能量的传输及分配上担任很重要的角色。土壤、植物和大气中有水时的热状况，与无水时有显著差异。

融解热　　水在结冰时放出热量、融冰时吸收热量，在冰点附近具有恒温作用。水在发生液相、固相转化时使环境热量变化缓和，生物体能够减轻或避免伤害。

表面张力　　水的表面张力在液体中也是最高的。土壤孔隙中有水分存在，表面张力起决定性作用。水在土壤孔隙中呈弯月面，半径比其他液体都大。曲面半径大，使大的孔隙中都能充水，含水量大，对植物有利。

由于水的相变，在地球表面，同一地点的不同高度，或不同季节，水经历着两、三相的动态平衡，水的相变对生物学过程起到极重要的作用。水本身就是物质的输送；相变过程中携带着的能量不断地变化，起到能量传输的载体作用；也为其他物质起到载体作用。这种作用规模较大，交换速度较快，是农田中联系能量和物质过程的关键因素。

**二、水的农业意义**

水是重要的农业环境因素，农业生产对象的整个生育过程要有一定量的水分。水分的多少影响着生物体的各个方面。水分是植物制造有机物质的原料。农作物进行光合作用，合成有机物质必须不断供给水分；少水时发生干旱，光合作用停滞，植株萎蔫；水分过多，则发生涝害，造成植物生理干旱等；水分也是植物光合作用过程中所需要的矿物营养元素的传输者；叶片的水分蒸腾也是植物根系从土壤中吸收水分和养分的动力之一（被动吸水）；蒸腾作用还调节着植物的体温，以保持在一定的温度范围内；叶片光合作用制造的有机物质输送到根、茎、花、果实等器官和组织中去，都必须有水分作为介质；水分是植物支撑的主要因素之一。水分充足时，植物体细胞组织保持高紧张度。这种支撑作用，以保证植物有相当的表面积，捕获足够的太阳能和$CO_2$。

当然，对于动物，水也是绝对必需的。

在水量的时间分配方面，不同生物体和品种在不同生长发育时期对水分的要求不同。我国降水的季节分配不匀，如水分的季节分配正好满足生物体的需要，就促进它们生长发育，获得丰产；如分配不均，发生旱涝，便抑制生物体生长发育，导致减产。

## §2 土壤—植物—大气水分循环系统

### 一、水分平衡

(一)土壤—植物—大气系统水分平衡方程

这个系统水分平衡方程中输入项为：降水R和毛管上升水$S_g$，植物截留$I_r$；输出项为：植物蒸腾$E_p$，土壤蒸发$E_s$，径流与排水q。在有灌溉的农田中，输入项还应有灌溉项。另有一部分水是贮存在系统内：植物体蓄水$\Delta S_p$和土壤蓄水$\Delta S_s$。

在不考虑农田灌溉的条件下，植被地的水分平衡方程为

$$(R+S_g+I_r)-(E_p+E_s+q)=\Delta S_p+\Delta S_s \qquad (4.1)$$

在(4.1)式中，从宏观的空间和时间考虑，降水项非常重要。但在较短的时段和有限的范围内，非降水的作用就更为显著。所以在研究农田水分与分析大范围水分循环问题时所着重的收入、支出项不尽相同。

从平均的数量看，晴朗的天气，气孔完全张开的条件下，植物在一天中蒸腾的水量是叶子含水量的12倍。所以，植物不从土壤中吸取水分，植物蒸腾就无法维持。植物的水分吸收和蒸腾作用是一个耦合过程中的两个环节。在这个耦合过程中，大量水分从土壤经植株体运输到叶片，再由叶片中的液态水变为汽态水而输送至空气中。这种贯通土壤—植物—大气连续的水流可以直观地理解，称之为土壤—植物—大气水分循环系统。

植物吸收水分大部分用于蒸腾，约占全部吸水的4/5还多。其余不到1/5则用于植株体的其他生理用水。在有植被的条件下，土壤蒸发约为总蒸发量的10%。

## （二）田间土壤水分平衡

整个田间作物系统，计算水分吸收、支出量的目的是搞清作物全生育期内或某一生育时期水分供应条件，以确定作物的灌溉量和作物生育期间土壤水分变化的特点。将土壤—植物—大气作为一个系统（SPAC）来分析，则水分的变化如图4.2。

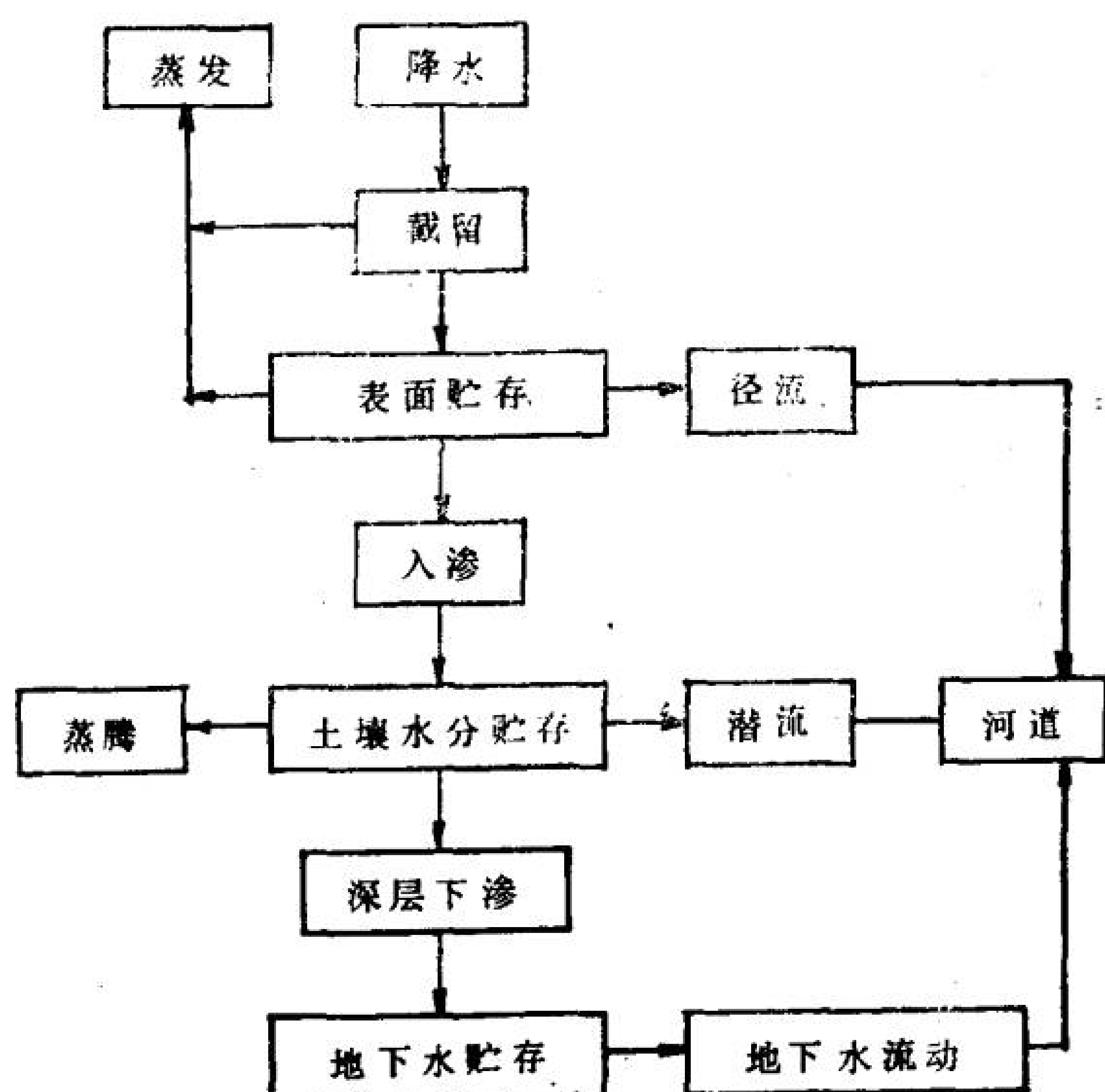



图4.2　水分循环示意图

图4.2确定了整个系统的水分输入量、输出量及状态变量。至于水分在这个系统内部是怎样（流通、交换、贮存）变化的，则可看作"黑箱"，而输入、输出之间的关系可写成如下土壤水分平衡方程：

$$(R+S_g+K)-(E_s+E_p+q_1+q_2)+W_h-W_k=0 \qquad (4.2)$$

式中，R为某时期内的降水量，$S_g$为毛管水上升量，K为该时期内灌溉量，$E_s$为土壤蒸发量，$E_p$为植物蒸腾量，$q_1$为地表径流量，

$q_2$为地下径流量，$W_h$为开始时土壤水分贮存量，$W_k$为该时期终止时土壤水分贮存量。$E_s+E_p$称为植物蒸散量。实际使用时，有些项目根据当时当地具体情况可以略去。

（三）降水后的分配

在（4.2）式的各组成分量中，除降水、蒸发、蒸腾、径流等在一般情况下可作一个常数处理外，其他还有：

1. 植物的截留

所谓截留，即降水落到地面之前，首先被植物冠层截去的那部分降水。

植被对降水截留量大小，取决于植被的类型、覆盖地表面的程度以及降水的强度和时间。截留总量较小，但在降水开始时占的比例较大，以后就不变了（如图4.3）。

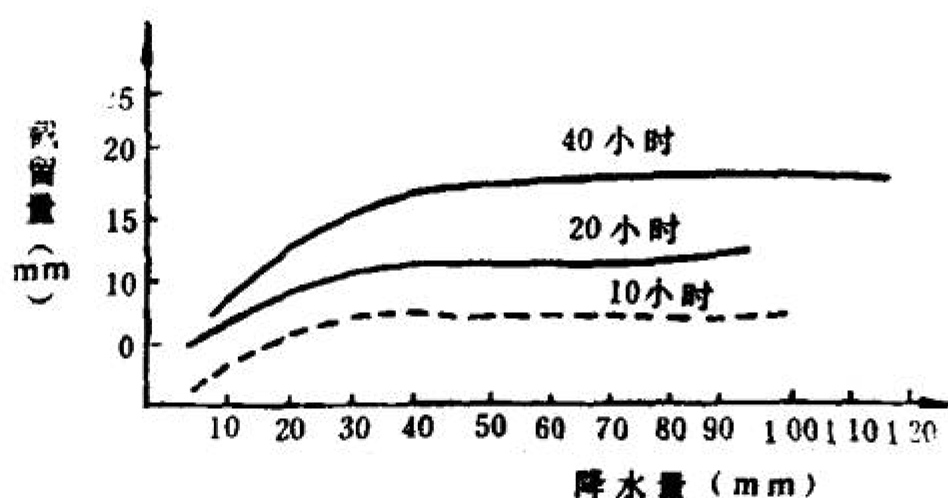


图4.3 截留量和降水量及降水持续时间（小时）的关系

植物不能吸收截留水，而是从茎、叶表面蒸发掉或沿茎秆流至地面。

不同植物及同一种植物不同密度，截留量不同。计算时，都取大致数字，如农作物约5％，森林则相当于20—30％，降水量＜5 mm时，一般全部被截留。

2. 下渗（渗透）

降水经植物截留后剩余的水透过地表渗入土壤中的过程称为渗透。若再向下渗，汇入地下的水称为渗漏。这个过程在暴雨期间特别重要。入渗强度决定了在地面产生的径流量。在入渗强度

成为限制因素时，被植物层所利用的水量就受到影响。

水分渗入土壤的速率主要取决于：

（1）时间。从降雨（或灌溉）起始计算时间（图4.4），起

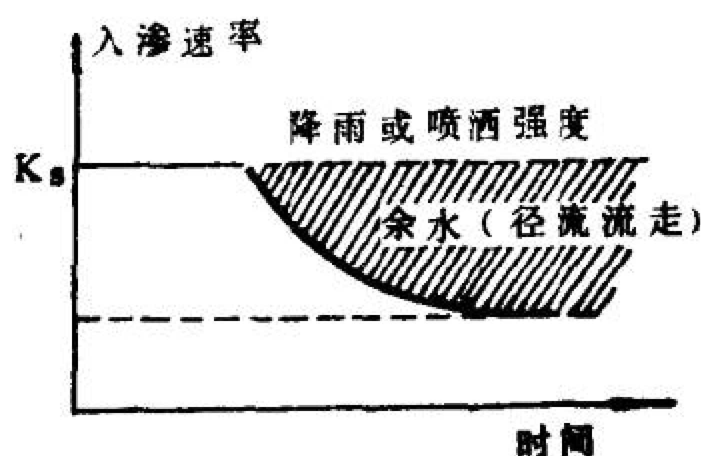



图4.4 入渗速率对时间的关系（D.Hillel）

初较高，等于降水强度，后来缓慢下来，最后趋于一个稳定速率（$K_s$），称为最终入渗速率，仅由土壤特性决定，与土壤湿度无关。（2）土壤初始含水量。初始土壤湿度大，开始入渗较慢，随着入渗较快地达到最终入渗速率$K_s$，但$K_s$与初始的含水量无关。（3）土壤导水性能。土壤饱和时的导水率越高，入渗得越快。一般土壤的导水率在不饱和时，随土壤湿度加大而变大，饱和时，明显受土壤结构和质地的影响，还有土壤的孔隙度、溶质浓度、气泡存在等影响。（4）土壤表面状况。植被覆盖地面能拦截并削弱雨滴的溅击，防止土壤结皮，保持土壤结构，因此初期入渗快，但最终入渗速率不变。

3． 地表径流

这是指未被土壤吸收，也未在地表积存，而是沿着地表向下坡流去，汇集于小沟和小溪中的那部分水量。这在降水强度大于入渗速率时才会发生。

径流单位用毫米或径流系数$\sigma$来表示：

$$\sigma=\frac{q}{R} \tag{4.3}$$

式中，q为径流，R为降水量，径流在降水强度大，特别是地势

不平处，如坡地上非常重要。

图4.5反映了渗透、径流和降水的关系，图4.5中②=①+③，忽略了截留。从一次降水过程来看，渗透在降水之初就发生了，当渗入达到高峰后，有径流产生，然后逐渐增大，在降水停止后，径流还将延续一段时间。

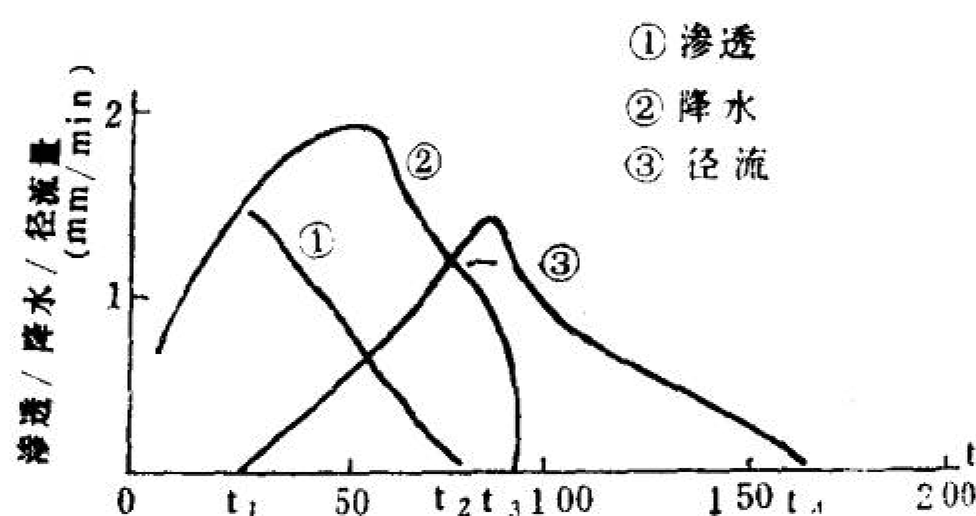



图4.5 渗透和径流逐时变化

对于农田，径流量大是不利的，因为水分流失，常引起土壤冲刷。农田生长有作物、土壤表面有起伏、土壤疏松，则减缓了水分在土壤表面的流动，而作物又可以延长它在田地上的贮留时间。所以有植被存在，能保护水土资源。

## 二、水分进入土壤及再分布

在地面水层消失后，水分渗入土壤，然后不断向各层次深入。在地面供水停止后水分在土壤中下渗的进一步运动称为水分再分布。水分的入渗及再分布决定了不同时段内土壤各深度所保留的水分数量，因而能影响植物水分收支。

### （一）水分进入土壤

水分渗入土壤，是由吸力梯度与重力梯度的组合作用。

水分的入渗可用达西定律来描述：

$$Q = -K\Delta H \qquad (4.4)$$

即通过多孔介质的液体流是沿着作用于液体的推动力（即水力梯度）的方向，其流速与推动力成正比，也与通过液体的传导介质

的性质（即导水率）成比例。Q为水通量，K为导水率，ΔH为水力梯度。

当水分向下渗透时，达西方程为

$$Q = -K\frac{dH}{dz} = -K\frac{d}{dz}(H_p - z) = K\frac{d\phi}{dz} + K \tag{4.5}$$

式中，$\phi$为基模吸力。

与连续方程结合，

$$\frac{\partial\vartheta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z}\left(K\frac{\partial\phi}{\partial z}\right) - \frac{\partial K}{\partial z} \tag{4.6}$$

式中，$\vartheta$为土壤容积含水量，t为时间，其他同上式。当初始和边界条件为

$$t = 0,\quad z > 0,\quad \vartheta = \vartheta_1$$

$$z = 0,\quad t \geqslant 0,\quad \vartheta = \vartheta_0$$

时，解为：

$$I = st^{\frac{1}{2}} + At$$

式中，s为吸水率，t为时间，I为入渗水累积量，A为常数。入渗速率，即

$$i = \frac{dI}{dt}\ \frac{1}{2}st^{-\frac{1}{2}} + A \tag{4.7}$$

当$t \to \infty$时，入渗速率就单值地减小到其最终渐近值$i(\infty)$。

自由水在土壤表面流动时，其进入湿润土壤的速率取决于土壤剖面中孔隙分布情况。孔隙越小移动越慢；移动速度也与温度有关，土温越高，流动越快。所以水分并非均匀地通过土壤在移动，而优先局限在某些孔隙中移动。如果土壤开始时就相当干燥的话，则湿润锋（上面湿度和下面干土之间好象形成一个界面）可能相当均匀一致地通过土层。但是，当土壤湿润后，大部分土层就将没有任何水分从中渗漏（粗砂质土壤例外）。

对任何干燥土壤来说，渗透速率开始时都是很高的，随着时

间推移而下降，这主要是由于入渗过程中出现的基模吸力下降所致（图4.6）。另外，土壤结构逐渐变坏，在地表形成密实的结皮，导致土壤局部封闭；堵塞土中孔隙的土粒被剥离随水移动，使孔隙堵塞；粘粒膨胀；气泡堵在土中或由水分进入土壤取代空气时空气逸出受阻，以致土壤中空气被压缩等。

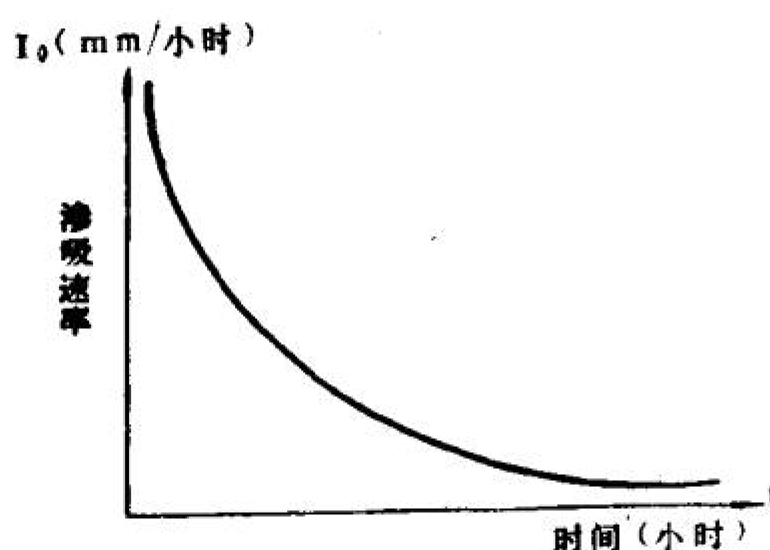



图4.6　土壤渗吸速率随时间的变化

当有限水分进入结构良好的深厚干土层中，水分以明显界限的湿润锋向下移动，干湿界限可保持几天。水分进入土壤的过程实际上包括了两个相互穿插的过程，当干燥土壤遇水以后，水分首先满足比较强的基模吸力，以弯月面保持在细孔隙中和以薄膜水保持在水土界面上，即进行不饱和流动。当水分增加到一定量时，水分在重力作用下，经粗孔隙向下渗透，即进行饱和流动。

（二）土壤水分的再分布

入渗作用结束后，在土壤内部，水分向下移动没有立即停止，还可持续一段时间。水分在重力、吸力梯度和温度梯度的作用下，继续向较干的下层移动，这个过程称为土壤水分再分布过程。

再分布速率主要取决于再分布开始时，土壤上层的湿润深度和下层土壤的干燥程度。若开始时上层土壤湿润程度浅，下层土

壤干燥，则吸力梯度大，再分布速率就快，反之，吸力梯度小，此时，水分再分布主要受重力影响，速率就慢。

再分布速率同渗透速率一样，随时间后延而减小，因为湿润层减少了水分，干土层增加水分，土层之间的吸力梯度下降；原先湿润层吸水后，其导水率相应减小，使湿润锋前伸速率减缓，湿润锋也逐渐模糊、消散。图4.7是土壤水分剖面在灌水后0，1，4和14天后的水分曲线，$W_1$是灌前的土壤湿度。

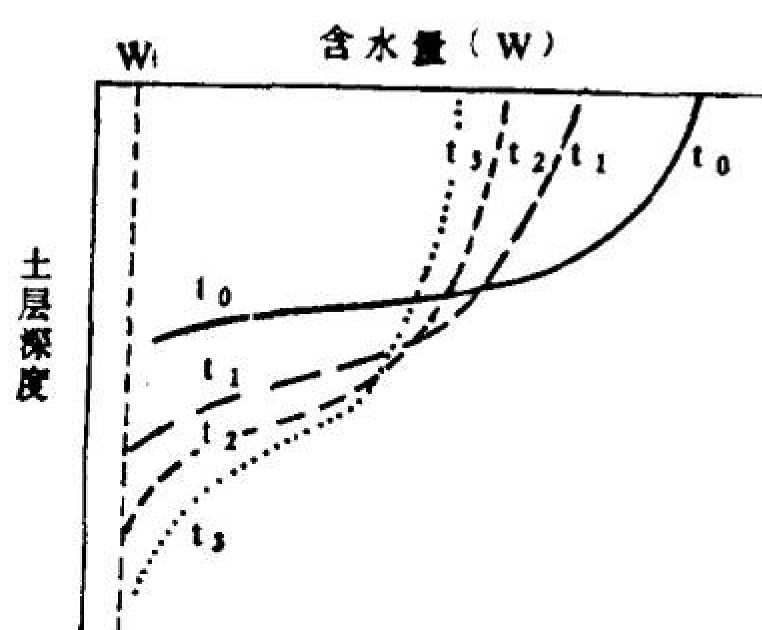



图4.7　灌溉终止后再分布期间，土壤水分剖面的变化
$t_i$（i＝0,1,2，3）分别为灌水后当天，
1天，4天和14天后的水分分布曲线

## 三、土壤水分类型

从力的角度来分析，水分在土壤中受到各种力的作用，使它能够保持在土壤中，产生运动现象。对应不同力所作用的水分存在状态，可分为吸湿水、毛管水、重力水等常规的土壤水分类型。

### （一）吸湿水（又称吸着水或紧束缚水）

吸湿水指烘干的土壤从含有饱和水蒸汽的空气中由吸附力吸附于土粒表面的水分。

土粒表面吸附空气中的水汽形成吸湿水时，会放出一定热

量，称为吸湿热或湿润热，砂土为4.2—10.5焦/克，粘土为20.9—29.3焦/克。随着土壤吸水的增加，放热量逐渐减少，当土壤达到一定湿度即接近最大吸湿量时，就不再放出吸湿热。吸湿热的释放，说明被吸附的水分子的能量（自由能）比原来气态水分子的能量要小，也说明土壤的吸湿水量尚未达到最大吸湿量。

土壤吸湿水的含量与空气的相对湿度成正相比。当空气湿度达到饱和状态时，土壤吸湿水即达到最大数量，称为最大吸湿量或吸湿系数。表4.1说明了土壤质地与吸湿水量的关系。

**表4.1 土壤质地与吸湿系数**

| 土壤质地 | 细砂 | 壤质砂土 | 砂壤土 | 轻壤土 | 中壤土 | 粘土 | 重粘土 | 泥炭土 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 吸湿系数(%) | 0.034 | 1.060 | 1.400 | 2.090 | 3.00 | 5.40 | 6.54 | 18.42 |

吸湿水由于被牢固地吸附在土粒表面，厚度极小，因而具有固态水的性质，密度大于1（最大可达1.4—1.5）；热容量低（2.1—3.3焦/立方厘米）；没有溶解营养物质的能力；不能自由移动，只能在105—110℃高温下汽化消失。对植物来说是无效水。

（二）毛管水

这是被表面张力以水膜形式吸附于土粒周围，由毛管水面凹曲产生的力所保持的水分，又分为薄膜水和毛管水。

为毛管所保持又与地下水不相连通者是毛管吸着水（毛管悬着水），吸着水中在土粒表面成薄膜状的水叫薄膜水，在土粒相互接触部位的水叫孔隙水；毛管吸着水达到最大数量时的含水量即称为田间持水量。

1. 薄膜水（又称膜状水、松吸着水、松束缚水）

当土壤的吸湿水达到最大量后，其外层所形成的一层膜状的液态水叫薄膜水。当薄膜水达到最大数量时称为最大分子持水

量。

薄膜水的性质与通常的液态水基本相似。因其水分子受土粒吸持而排列得较紧，故密度大于1，冰点低于－15℃，具有较高的粘滞性而无溶解性，它能以湿润的方式，从水膜厚的土粒向水膜薄的土粒缓慢地移动。其移动速度一般为0.2—0.4毫米/小时。

薄膜水的含量同吸湿水一样，也决定于土壤质地和有机质的含量。土壤质地粘重，含有机质多，薄膜水含量就高，反之就低。其含量还与土壤溶液浓度有关，浓度大，渗透压就高，薄膜水的含量就少，故在盐碱土中，几乎没有薄膜水。

2. 毛管水

毛管水的性质和运动主要取决于毛管力。毛管力就是指毛管壁与水分子间的吸持力与水的表面张力的共同作用。土壤孔隙的毛管作用因毛管直径大小而不同。一般，当土壤孔隙直径大于8毫米时，没有毛管力的作用；当直径为8毫米到0.1毫米时，毛管作用就逐渐显现出来；直径在0.1毫米至0.001毫米范围内，毛管作用最明显；如果直径小于0.001毫米，则其间为薄膜水所填充。

但实际所保持的水分不能截然地区分为毛管水和吸附水。而且土壤毛细管并不是平直匀称的管子。土粒有不规则的形状，所以，它们之间也形成不规则的空隙。在大多数土壤中，土壤孔隙在几何学上的特点是，孔隙宽度的变异极其急剧，比较宽阔的空隙是通过更为狭窄得多的细长空隙才能和别的较大的空隙相连通。这样，土壤中的水分是以形状和厚度都极不规则的薄水膜或薄水层状存在的，这些水分有时是与固定颗粒交界，有时又与空气弯月面交界。

毛管水的理化性质具有自由水的特点，其所受的吸力为0.08—6.25大气压，比植物的吸水力（15大气压）要小，易被植物吸收利用。由于毛管水可进行多方面的移动，又有溶解养分的能力，所以能供应植物所需要的水分和养分。在地下水位较高的情

况下，深层的水分可沿毛管上升至根系活动层。因此，毛管水在农业生产上是对植物最有效的土壤水分。

（三）重力水

因重力而排出的水，不能保持在土壤中。当土壤中的水分超过了土粒吸引力和毛管力的作用范围后，多余的水分就会在重力的作用下沿着土壤非毛管孔隙而下渗。

重力水具有一般液态水的性质，能被植物吸收利用，但是，由于受重力作用，不易保持在土壤上层，绝大多数没有机会被植物吸收利用，因而重力水直接对植物的好处不大，相反，对旱作物来说，重力水多，造成水、气矛盾，反而对作物生育不利。

土壤水分的特性列于表4.2。

**四、土壤水分常数**

土壤水分在吸附力、毛管力、重力等作用下运动，并与植物对水分利用情况产生联系。同样的水分经常从一种力的作用转到另一种力的作用，水分含量发生变化。我们把这些临界值区分开来，即为土壤水分常数。常用的土壤水分常数有七个。

吸湿系数（又称最大吸湿量）　土壤吸湿水达到最大数量时的土壤含水量。这种水分被土粒牢固吸持，不能被植物吸收利用。

凋萎系数（又叫凋萎含水量或凋萎湿度）　植物产生永久凋萎时的土壤含水量，包括全部吸湿水和部分膜状水。此时的土壤含水量处于土壤水分不能补偿植物耗水量的水分状况，通常把它作为植物可利用水量的下限，凋萎湿度时水的吸附为15198.8百帕，是最大吸湿量的1.5—2.0倍。

最大分子持水量　膜状水的水膜达到最大厚度时土壤所含的水量。包括全部吸湿水和膜状水，一般土壤的最大分子持水量约为最大吸湿量的2—4倍。

田间持水量（又叫土壤最小持水量）　土壤中毛管悬着水达到最大量时的土壤含水量。包括全部吸湿水、膜状水和毛管悬

表4.2　土壤水的物理学和生物学特点

| 土壤水 | 物理学特点 | 生物学特点 |
|---|---|---|
| 自由水（重力水） | （1）保持张力101—8106百帕<br>（2）因水膜张力和重力而移动<br>（3）水分子很不固定 | （1）对植物无益，过多时则产生缺氧条件，需排水<br>（2）会淋溶掉土壤中的养分 |
| 毛管水 | （1）水膜张力为8106—31410.8百帕<br>（2）能溶解有机物质<br>（3）水的移动由水膜调节，由厚膜向薄膜移动，即随张力而变化<br>（4）张力大，可起固定分子移动方向的作用 | （1）植物需要这种水，大部分是有效水<br>（2）对土壤养分起溶解作用，为植物提供矿物养分 |
| 吸湿水 | （1）张力大于31410.8百帕<br>（2）大部分是非液态水，不能溶解有机物质<br>（3）主要以水汽形式运动<br>（4）水分子呈定向形式，密度大于1 | （1）对植物无效<br>（2）大部分都保持在土壤胶体之中 |

着水。田间持水量是在不受地下水影响的自然条件下所能保持的土壤水分的最大数量指标。当灌水量超出田间持水量时，只能加深土壤的湿润程度，而不能增加土层中含水量的百分数。因此，它是土壤中对植物有效水分的上限和计算灌水定额的依据。

毛管断裂含水量　　指土壤中的毛管悬着水由于植物的吸收利用和土表的蒸发作用，其数量不断减少，当减少到一定程度时，其连续状态断裂，从而停止了毛管悬着水的运动，这时的土壤含水量，称为毛管断裂含水量，植物虽能从土壤中吸收水分，但因补给不足，处于供不应求的状况，生长受阻滞，因而又把毛管断裂含水量称为生长阻滞含水量。当土壤水分高于这一数量时，土壤水分的有效性显著提高，并能较迅速地满足植物的需要，因此，毛管断裂含水量一般可视为水分对植物有效性的一个转折点。毛管断裂含水量因土壤质地、结构和孔隙状况不同而异，一般约为田间持水量的65%左右，可用此作为灌水的下限。

毛管蓄水量（又称最大毛管水量）　　土壤毛管孔隙都充满水分时的含水量，它包括吸湿水、膜状水和毛管上升水。

全蓄水量（又称全持水量或土壤饱和含水量）　　土壤所有孔隙全部充满水分时的含水量。当土壤水分近于或等于全蓄水量时，土壤通气性变差，对植物生长发育不利。

不同类型土壤的水分常数不同，主要决定于土壤质地和结构。质地和结构相近的土壤，其水分常数大体相近，而不同质地和结构的土壤达到某一水分常数时，其含水量则不同（但被土壤所保持的力是相同的）。表4.3是中国科学院土壤队1961年测定的华北平原不同土壤质地的几种水分常数。表4.4是土壤农业水分常数及其有效性示意表。

表4.3 华北平原不同土壤质地的几种水分常数

| 水分常数 / 土壤质地 | 水分常数 | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 重量（%） | | | | 体积（%） | | | |
| | 最大吸湿量 | 凋萎系数 | 田间持水量 | 全持水量 | 最大吸湿量 | 凋萎系数 | 田间持水量 | 全持水量 |
| 砂壤土 | 1—2 | 4—6 | 22—30 | 30—40 | 2—3 | 5—9 | 32—42 | 45—52 |
| 轻壤土 | 1—2 | 4—9 | 22—28 | 28—40 | 2—3 | 6—12 | 30—36 | 40—52 |
| 中壤土 | 2—3 | 6—10 | 22—28 | 30—38 | 3—5 | 8—15 | 30—35 | 44—54 |
| 重壤土 | 2—3 | 6—13 | 22—28 | 28—38 | 3—4 | 9—18 | 32—42 | 40—50 |
| 轻粘土 | — | 15.0 | 28—32 | 32—40 | — | 20.0 | 40—45 | 45—54 |
| 中粘土 | — | 12—17 | 25—35 | 35—40 | — | 17—24 | 35—45 | 48—53 |
| 重粘土 | — | — | 30—35 | 38—42 | — | — | 40—50 | 48—55 |

## §3 土壤—植物—大气水分传输

### 一、土壤水势与水分传输

（一）水势的概念

水势定义为系统中水的化学势与同温同压下纯水化学势之差。

化学势是指在一个无限大的系统中，在等温等压下保持各组分浓度不变时，加入1克分子i物质所引起的自由能的增量。所以水的化学势即当温度、压力及物质数量为一定时，因水量变化引起的吉普斯自由能的变化。

依据水势的概念，对植物、大气、土壤中的水分能态，都可以用相对于根系的水势来衡量。按系统分析的方法，可以将农业生物层作为一个系统对待，即SPAC。

植物根细胞要从土壤中吸水，其水势一定要低于土壤溶液的水势。对大多数植物来说，其水势一般在$10^6$—$2\times10^6$帕之间（农业中，以$-1.5\times10^6$帕为土壤的凋萎系数）。土壤在正常情况下，其水势远高于$-1.5\times10^6$帕，因此，植物根细胞就可以顺着水势的梯度吸水，并经过茎部导管输送到叶片，再化为水蒸汽穿过气孔散失到大气中去，成为一个连续体。

整个过程，有液相、气相，逆着地心引力向上移动数米，甚至几十米，但总趋势仍是以土壤与大气间的总水势落差进行的，即自由能降低，达$10^7$—$10^8$帕，最大值产生在大气与气孔之间（表4.5和图4.8）。

**表4.5 SPAC中各部分水势**

| 部位 | 土壤近根部 | 根的木质部（靠近地表面） | 叶肉细胞的液泡（地上10厘米） | 气孔中空气（95%湿度） | 气孔外空气（60%湿度） |
|---|---|---|---|---|---|
| 水势（帕） | $-5\times10^5$ | $-6\times10^5$ | $-8\times10^5$ | $-6.9\times10^6$ | $-7.0\times10^7$ |

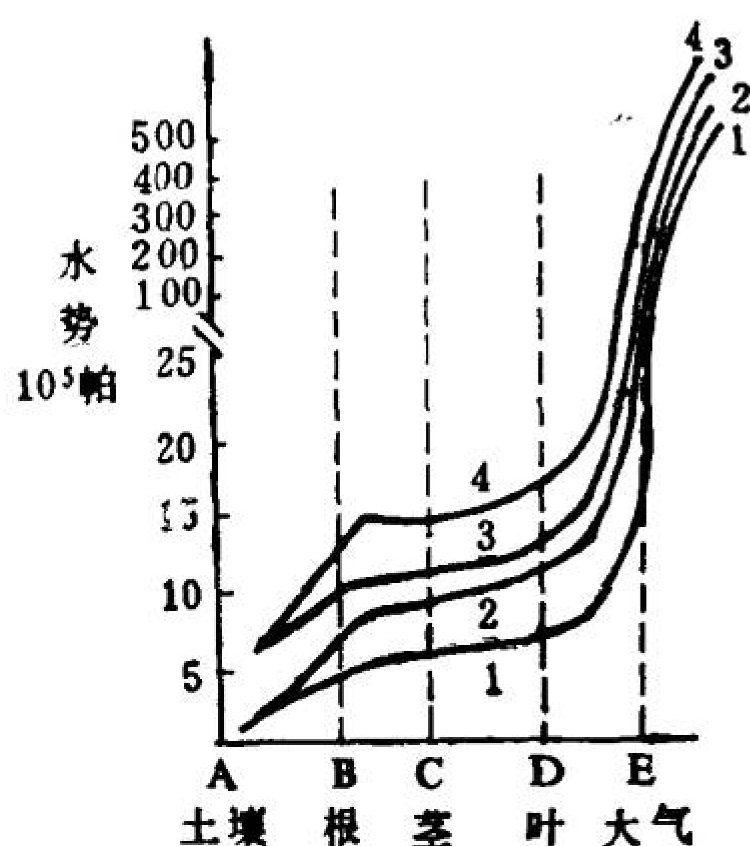



图4.8　SPAC中不同土壤吸力和大气蒸发力下的水势分布

（二）水分传输过程

从土壤至植物根部，从根部至植株的叶肉细胞，从叶肉细胞至气孔，从气孔经受气孔阻力和叶面边界层阻力至大气中，每一阶段的水流阻力r都可按下列方程来确定：

$$r=\frac{\Delta\phi}{Q}=\frac{\text{水势的降低}}{\text{水通量}} \tag{4.8}$$

（4.8）式在形式上与欧姆定律相同，可以用串联电阻的电流来模拟SPAC中的水流。对稳定的水流，蒸腾与植物输水速率相等，也与土壤水分的吸收速率相等。各部分之间水流量可以写成：

$$Q=\frac{-\Delta\phi_1}{R_1}=\frac{-\Delta\phi_2}{R_2}=\frac{-\Delta\phi_3}{R_3} \tag{4.9}$$

式中，$\Delta\phi_1$为土壤与根之间的水势差，$\Delta\phi_2$为根与叶的水势差，$\Delta\phi_3$为叶与大气的水势差，前两者为$10^6$帕左右，$\Delta\phi_3$最大，约$5\times10^7$帕；$R_i$为相应阻力，$R_3$比$R_1$、$R_2$大得多，特别当气孔关闭时。阻力大，蒸腾就减弱。

植物根系从土壤中吸收的水分释放到大气中去，这是一个蒸腾过程，可以看作水分在系统中运动。水分扩散、输送经过了不同的介质：土壤、植物、空气。它包括四个过程：

A过程：水（液体）从土壤向根系表面移动；B过程：水(液体）从根系通过茎向柔软细胞表面的植物组织移动；C过程：水（气体）从柔软细胞表面通过气孔前室，由气孔向叶表面移动；D过程：水（气体）通过叶面边界层周围空气从叶面向周围空气中移动。

（1）水分从土壤向根内移动，土壤中水分通量可表示为

$$Q=-k\frac{\partial\phi}{\partial z} \tag{4.10}$$

式中，k为渗透系数。设根周围水的流动是常数，根系层内的含水量一定，则k也就一定，根系对土壤水分的吸收为

$$Q=\frac{\phi_r-\phi_s}{b/k} \tag{4.11}$$

式中，$\phi_r$为根部的水势；$\phi_s$为土壤的水势；b为经验常数，与根系形状、根活力、根系深度有关，k为扩散系数。

布达科夫斯基（Budagovsky）认为，根系水分的吸收量Q（$g/cm^2\cdot s$）可近似为$Q=k_s(W_s-W_r)$（4.12）式中，$W_s$，$W_r$是根系层内和根表面的水分含量($cm^3/cm^3$)；$k_s=2\pi r_0nbkH_r$为有效扩散系数，$r_0$为根毛半径，n为单位容积中平均根数，$H_r$为根系深度。

（2）水由根部向叶片流动，在植株体内水分移动，近似于下式：

$$Q=\frac{\rho(\phi_l-\phi_r)}{R_pl} \tag{4.12}$$

式中，$\phi_l$、$\phi_r$分别为叶内、根的吸引力（即水势负值），$R_pl$为植物总阻力，$R_pl=rx_1+rx_2+r_w$，$rx_1$、$rx_2$、$r_w$分别为水流在根、茎、叶内的阻力。向日葵、番茄根、茎、叶的阻力大体为50：25：

25（%）。

（3）水由细胞表面向叶面和空气层的移动，这里水只有变成水汽才能扩散出去，叶内总的阻力$r_l$可以写成

$$\frac{1}{r_l}=\frac{1}{r_c}+\frac{1}{r_s+r_i} \quad (4.13)$$

式中，$r_s$为气孔阻力，$r_i$为气孔内的扩散阻力，$r_s+r_i$称为气孔阻力，$r_c$为表皮阻力。叶片的蒸腾强度主要由$r_s$和$r_i$支配，$r_c$在不同植物间相差很大，中性植物为20—60秒/厘米，旱生植物400秒/厘米。气孔阻力随气孔开度而变化，随日射强度的增加而下降，黄昏时又增大。若土壤水分不足，气孔阻力增加几倍。

植物的蒸腾强度即水流强度，从（4.11）、（4.12）式中消去根部水势$\phi_r$，得到蒸腾强度为

$$E_p=\frac{\phi_l-\phi_s}{R_p l+b/k} \quad (4.14)$$

## 二、土壤水势的分布

水势可以判断水分运动的方向。水分的运动只能顺能量梯度移动，即水分运动总是从水势高的地方向水势低的地方移动，沿着自由能降低的方向移动，两处水势相等时达到平衡。这是从能量的观点来认识水分运动的。土壤、植物之间水分移动，主要是由两点间的水势造成的。

土壤中的水势，经常受到压力、溶质、基质的影响而有所增减，另外，也与海拔、温度等有关。组成系统中水势的分水势有：基模势（$\phi_m$）、渗透势（$\phi_x$）（也叫溶质势）、压力势（$\phi_p$）、重力势（$\phi_g$）、温度势（$\phi_t$）。系统中水势$\phi_w$是它们的代数和。

$$\phi_w=\phi_m+\phi_x+\phi_p+\phi_g+\phi_t \quad (4.15)$$

（4.15）式中$\phi_m$在土壤中是由土壤基粒的吸附力和毛管力所引起的水势。在细胞中是由于水分子与细胞质、细胞壁中的多糖类、蛋白质大分子中氧、氮、硫的基团之间，氢键结合。这些力有

降低水势的作用，统称基模势，是负值，也称间质势。

在土壤中$\phi_m$是组成水势的主要部分，而在植物中很小，干旱时植物组织中的$\phi_m$较大。

式中$\phi_\pi$是指水中溶质的溶解所引起的水势降低。它可由渗透计测定出溶液的渗透压（$\pi$），这是正的，绝对值加负号即为渗透势，$\phi_\pi = -\pi$。植物组织中$\phi_\pi$主要与液泡中各种溶质有密切关系，是负值。

式中$\phi_p$当系统处于一个大气压时$\phi_p = 0$，$\phi_p$对细胞来说，指膨压或壁压，$\phi_p > 0$。草本植物白天的压力势为$3\times10^5$—$5\times10^5$帕，夜间蒸腾减弱，压力势为$15\times10^5$帕。整个植物水势的变化与$\phi_p$变化关系很大。

土壤的压力势由三种分压势组成：（1）气压势。由于空气被封闭在土壤内使平衡气压发生改变而产生的压力势；（2）静水压势。土壤中存在水层，对下面的土壤水分产生静水压力所引起的作用；（3）荷载压势。由土壤水中含悬浮体物质所产生的荷载压力引起的。

（4.15）式中$\phi_g$由重力所引起的水势，它大于零，用单位质量的势能表示，$\phi_g = gh$，取决于相对高度，当海拔很小时，可以忽略。

对$\phi_t$，当处于恒温或温度变化不大时形成的水势，$\phi_t = 0$。

总水势是以上分水势之和。在土壤水不饱和时，水势主要取决于$\phi_m$，而在盐碱土以及研究土壤—植物水分关系时，$\phi_p$，$\phi_\pi$也起作用。

水势的单位是“力”的单位，通常用大气压（百帕）表示，也可以用能量单位表示。

水势的计算：

液相（如糖液、盐溶液）的水势：

$$\phi_w = -\frac{RT}{V_w}\ln\frac{1}{N_w} \tag{4.16}$$

气相的水势：

$$CP_w = -\frac{RT}{V_w}\ln\frac{P_0}{P} = -10.7Tlg_{10}\left(\frac{100}{RH}\right) \quad (4.17)$$

式中，P为试验小室内空气的水汽压；$P^0$为纯水在该温度下的水汽压；RH为该温度下小室内空气相对湿度；$V_w$为水的克分子体积等于$18\cdot07cm^3$；

$$N_w = \frac{水的克分子数}{水的克分子数+溶质克分子数}$$

## 三、土壤水分特征曲线

### （一）土壤水分特征曲线

土壤水分含量与对应的自由能对数（$P^F$）所成的相关曲线称为土壤水分特征曲线。自由能可表示为水势，也可表示为吸力。

土壤水分不饱和时，构成水势的几个分势形成了土壤吸力。水势越低，吸力越大，两者数值相等，符号相反。土壤吸力实质上不是指土壤对水分的吸力，而是指土壤水分在承受一定吸力情况下所处的能态，数值上可以用土壤对水分的吸力来表示。例如，测定土壤吸力为$10^5$帕，那么土壤水即处于$10^5$帕吸力下的能态，因为如施加外力大于$10^5$帕，水分就流出。

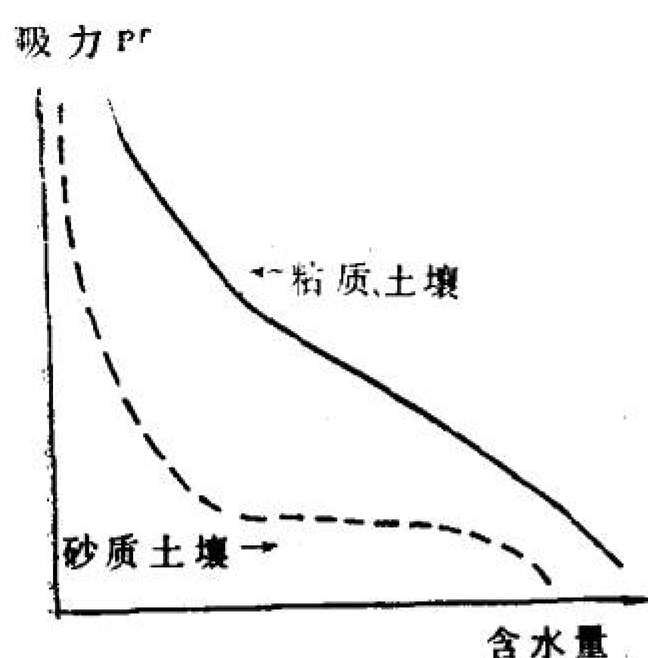



图4.9　土壤水分特征曲线
（D.希勒尔）

土壤变干时，自由能下降。低于自由水的自由能，吸力提高，将使土壤中越来越小的孔隙被排空，所以提高吸力就是使土壤湿度降低。平衡时土壤中保持水的数量是充水孔隙的大小和容积的函数，也是基模吸力的函数。如用原状土样，测定在不同土壤水吸力下相应含水量，然后将各点资料绘制成图4.9。它能表明土壤在某一含水量时，土壤水分所受的吸力，或土壤

水处于某一吸力时，土壤水分的含量。

不同质地的土壤，其特征曲线形状相似。在同一吸力下，粘土含水量大于壤土，壤土大于砂土。在同一含水量的情况下，砂土吸力最低，粘土最大。从对植物的有效性来说，同样含水量的条件，砂土吸力小，可能有效水分更多。

（二）土壤吸力与湿度

目前，以基本土壤性质表示基模吸力与湿度的关系还没有令人满意的理论。吸附作用与孔隙形状的关系极为复杂，不能用简单的模型说明。威塞尔（Visser，1966）曾提出过一个经验公式：

$$\phi = a\ (f-\theta)\ b/\theta^{c} \qquad (4.18)$$

式中，$\phi$为基模吸力，f为孔隙度，$\theta$为容积含水量，a，b，c是常数。

加德纳等（Garder et al.，1970）提出如下经验性关系：

$$\phi = a\theta b \qquad (4.19)$$

常数b对细砂壤土为0.43，这种关系适用于特征曲线的有限范围，对分析含水量范围较窄的过程可能是有用的。

在基模吸力相对低时，保持土壤水量主要取决于毛细管作用和孔隙分布，土壤结构的影响也较大。在吸力较大时所保持的水分，吸附作用就逐渐增强，质地和土壤物质比表面的影响较多而结构影响较小。所以土壤水分特征曲线受土壤质地影响大，一般粘粒含量多，含水量较大，曲线的斜率缓和。在砂质土壤中，孔隙相当大，大空隙排空后，仅有少量的水存留。粘质土壤孔径分布较为均匀，同时吸附的水也较多，所以提高基模吸力使土壤水含量较缓慢地降低。

（三）滞后作用

水势与土壤含水量的关系往往不是单值性的。特征曲线可以通过脱水过程逐次测定含水量对吸力的关系，也可以通过相反的吸水过程来确定。这两种方法测得的连续曲线并不重合，同样吸

力的土壤湿度在脱水过程中较吸水过程为高，这种现象称为滞后作用（图4.10）。

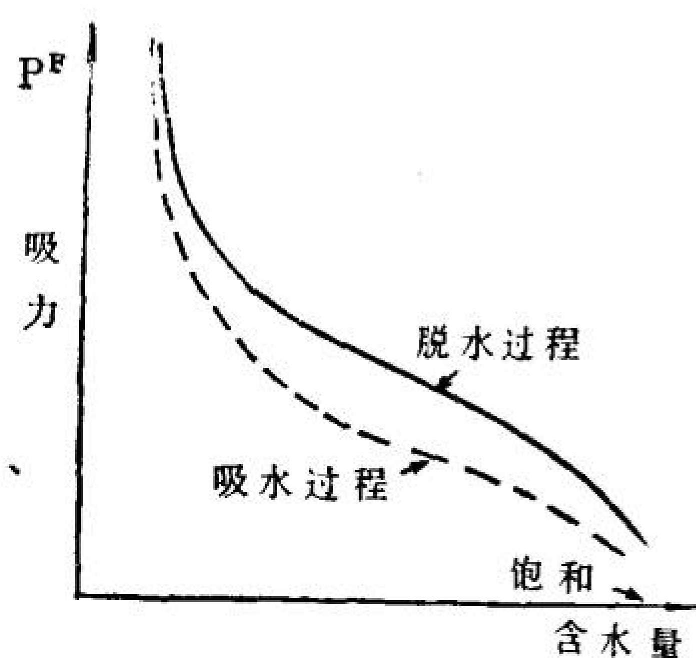


图4.10 脱水和吸水过程中吸力—含水量曲线（D.希勒尔）

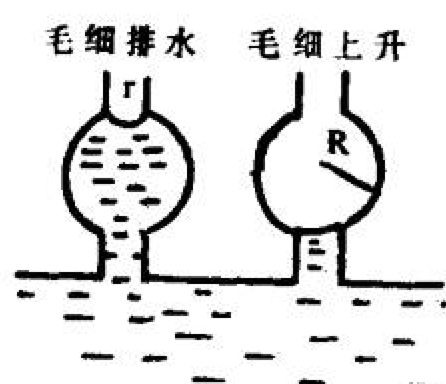


图4.11 孔隙的“墨水瓶”作用

滞后现象与土壤类型有关，一般砂土比较明显，粘土不太明显。两个完整的特征曲线，称为滞后作用的主线。当半湿润的土壤开始排干或部分脱水的土壤重新湿润，吸力和含水量关系顺着一些中间曲线前进，由一条主线变动到另一主线。滞后作用的原因可以归结为：

（1）单个孔隙间的几何不均一性，产生“墨水瓶”作用（图4.11）。假想中的空隙，包含有宽的孔隙（R），狭小的孔隙（r），如果最初饱和，当吸力大于毛管力$\phi_r$时，排水，则

$\phi_r = \frac{2\sigma}{r}$（σ为液气表面张力）；而再次湿润时，吸力必须达

到$\phi_R = \frac{2\sigma}{R}$，所以$\phi_r > \phi_R$。

（2）接触角作用，前进的弯月面比退缩的接触角大，即曲率半径较大。在一定含水量下，脱水过程较吸水过程表现出较高的吸力。

（3）土团中被包围的空气，降低湿润土壤的含水量，达不到真正平衡，加强滞后作用。

（4）膨胀、收缩或老化现象，它们因变湿和变干的历程对土壤结构影响有差别。空气的逐渐溶解，或溶解在土壤水中的空气释放出来，也能在变湿和变干系统中的吸力—湿度关系上产生差别。

## 四、土壤—植物—大气系统中的气态水

在土壤—植物—大气系统的传输通道两端有气态水的运动，如土壤蒸发（$E_s$）、植物蒸腾（$E_p$）和土粒间的水汽运动。

在土壤—植物—大气系统中，温度条件不变时，水从自由能高的地方向自由能低的地方移动。当形成稳定的水流时，则整个系统中各个环节的通量不变。植物根系从土壤中吸水直到最后蒸腾到空气中去，包括一系列生理和物理过程。但其整体速率则由其中速率最慢的一个环节所控制，这个环节就是对水运动阻抗最大的过程。

## 五、植物水分的散失——蒸散

（一）蒸散研究在农业生产中的重要性

植物失水的方式主要是蒸散，即植物生长期内叶面散发量（蒸腾）和棵间土壤蒸发量之和。

农业生产中很注意水分使用效率，总期望所有的雨量或灌溉水都渗进土壤并由土壤保持，以便植物吸收利用而毫无损失，达到用少量的水生产可能多的物质。蒸散的研究有助于指导适宜的耕作制度以减少水分损失，或用于设计灌溉方案以满足季节的和年份的需水量的调剂，使水分得到高效率的利用。

我国干旱半干旱以及半湿润、湿润易旱农业区，需以灌溉来克服缺水问题，这就需要使水分得到有效的利用，减少无效损失。这就必须研究植物的需水量以及供水方式和时间。为此，估计蒸散就能给出不同季节内各类植物生育时期的水分需要量，加上适量的水分损失即为灌水要求。因此掌握植物各个生育时期中

的蒸散量便基本上能确定灌水定额。研究植物灌溉、设计灌水计划、预报灌水时间及防御干旱，都必须知道植物的需水上限。

就一、二年生作物的整个生长发育周期来说，对水分的要求一般表现为“少—多—少”的规律。具体需水数量决定于当时当地的气象条件。

蒸散研究除了用于灌溉，也有助于研究各种土壤气候带，这对于发展合适的耕作制度、引用适宜的品种以及对水分管理技术、种植方式和挖掘作物生产潜力等都有重要的意义。

（二）影响蒸腾作用的因子

叶片　叶片的大小、形状、表面特征和叶片方位影响入射能量的吸收和反射以及叶温，从而影响到叶面阻力。叶片的大小、形状也影响到外部阻力，而叶片内部结构影响到内部水汽运动。

叶面积　叶片大而多的植物往往比叶片小而少的植物蒸腾量大，但当叶面积减少时，蒸腾也并不随之成正比例地减小。密勒（Miller）作过试验，发现除去一部分叶片后，单位植株的蒸腾量减少，而单位叶面积的蒸腾量增加，这是由于叶片更分散，增加了空气流动，减少叶片的空气间阻力（$r_a$）所致。此外，根冠比率的增加，叶片得到更多的水分。多年生的木本植物，水分缺少时，叶子卷曲，减少暴露的表面积，增加水汽扩散阻力，中生植物叶片卷曲能减少蒸腾约37%，而旱生植物能减少75%。叶片的相互遮荫也能大大减少蒸腾表面。

不同品种单位叶表面积的蒸腾差异非常显著，但是，总叶面积的差异有时对叶面积蒸腾起一定的补偿作用。

根冠比例　根冠比例比单纯用叶面积研究更为重要。帕克（Parker）发现，当发生作物水分亏缺，水分的吸收影响到蒸腾时，单位叶面积的蒸腾随着根叶比的增加而增加。一般根系发育好的植物比深度浅、范围小的更能抗旱。蒸腾与根冠比的关系如图4.12所示。

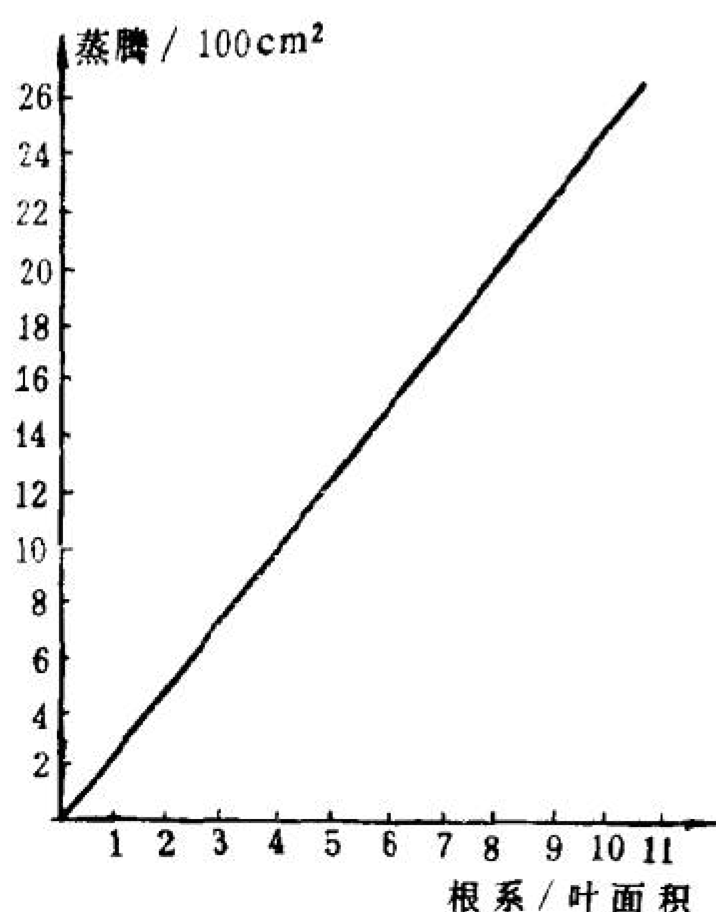



图4.12 蒸腾与根冠比的关系（Kramer和Kozlowski，1979）

移栽时期根部受损会导致草本或木本植物的根冠比不适宜。移栽的树木或灌木顶部通过落叶来补偿根部的受损。夏季干燥地区树木常具有发达的根系和高根冠比。

叶片方位　　蒸腾率受叶片方位的影响，因为叶片与太阳光成直角比与太阳光平行能收到更多的太阳辐射。大多数叶片的方位都趋于接收更多的入射辐射，这不仅对光合作用有利，对蒸腾也是有利的。还有些植物叶面趋于与平均入射平行，这也许可以更适应干热条件下的生存，针叶树相互遮荫，减少蒸腾也减少叶片的光合作用。

叶片的大小和形状　　叶片大小、形状影响蒸腾率是由于它们影响到空气的阻力。如图4.13，10厘米宽的棉花叶比 1 厘米宽的草叶空气阻力约大 3 倍。因为小叶片上的边界层薄，更有利于显热交换和潜热交换，减低叶片水势而降低蒸腾；边界层阻力变小，使小叶片更易失水，两方面趋于互相补偿。按史密斯(Smith)的研究结果：大多数沙漠多年生植物具有叶小特点，叶温接近于

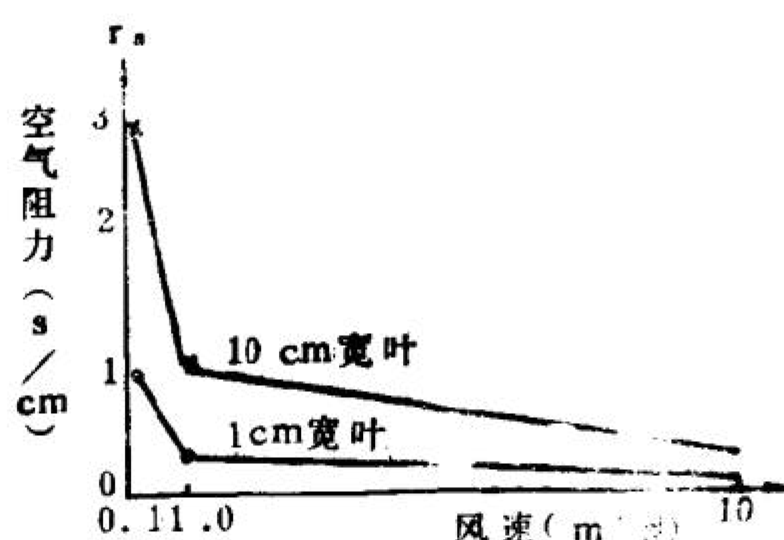



图4.13　三种风的情况下，棉花叶（10厘米宽）和草叶（1厘米宽）的空气阻力（Slatyer,1967）

气温，以调节蒸腾。当雨水充足时，蒸腾冷却叶片，光合效率比其他气温相同的沙漠植物光合效率更高。

叶片表面特征　叶片、茎、果实甚至花瓣的表层常覆有防水层，即表皮，它由蜡状物和角质组成。对水分的渗透性显然是由蜡状物控制而不是由角质层厚度控制的，除去蜡质，蒸腾常常增加好几倍。表皮上蜡质的多少变化较大，决定于植物的品种和环境条件，一般在干燥空气中生长的叶片其表面的角质和蜡质多些，有蜡层的高粱作物蒸腾率比没有蜡层的低。

有些植物表面有一层毛，白色，密而柔，它比绿叶反射更多的辐射，叶温低，蒸腾也小。但辐射被皮毛反射后，净光合率也降低了。总起来看，叶温降低不但能引起净光合量减少，而且对降低蒸腾更有利。

气孔　蒸腾的水分大部分通过气孔失去，进行光合作用的二氧化碳也是由气孔进入的。对于光合作用，希望气孔开放得尽可能大，而对水分又希望气孔闭合。在光照下气孔通常是开的，在黑暗中闭合。

影响气孔运动主要的环境因子是光、二氧化碳、湿度和温度。

气温在生长季内对植物气孔一般是适宜的，影响可以忽略。

近年来，用最优化理论来解释气孔运动，支出项为水分，收入项是二氧化碳，最优化理论认为气孔开度的日变化使植物具有最大光合效率和最小蒸腾率。蒸腾($E_p$)与光合作用（A）似乎趋于一个常数（$\frac{dE_p}{dA}$=常数）。Wang等（1979）认为，至少对有些作物，气孔的开度是保持内部与外部的二氧化碳为一个常数比例，并认为气孔能使其开度保持使二氧化碳进入为最适程度，控制水分损失。

## §4 水分与作物的生长发育及产量形成

### 一、土壤水分与植物生长发育

#### （一）土壤水对植物的有效性

##### 1. 经典概念

土壤中水分对植物不是都有效的，或者说土壤中不同含水量对植物有效性不是相等的。土壤水分有效性的概念，常常引起争论。一种观点认为：土壤水分从上限（即田间持水量）到下限（即永久萎蔫点）的范围以内都是同等有效的，这上、下限都是任一给定的土壤特征，而且是个常数。即土壤湿度没有降到永久萎蔫点以前，植物的功能是不受土壤湿度减小的影响。土壤湿度一旦降到这一点，植物的生命活动就受到抑制。

另一些研究证明，土壤水对植物的有效性确是随着土壤湿度的降低而减小；植物在土壤湿度降到萎蔫点之前就可能遭受水分亏缺，使生长受严重抑制。也有人想在上述对立的观点之间进行协调，使土壤湿度的“有效范围”分成“极易有效”和“有效性递减”等不同范围，并在田间持水量与萎蔫点之间寻找“临界点”，作为土壤水分有效性的特定指标。

关于土壤水分对植物的有效性的三种传统假定如图4.14所示。即（a）从田间持水量到萎蔫点之间同等有效；（b）从田间持水量到水分“关键点”之间都同等有效；此后湿度下降，有效

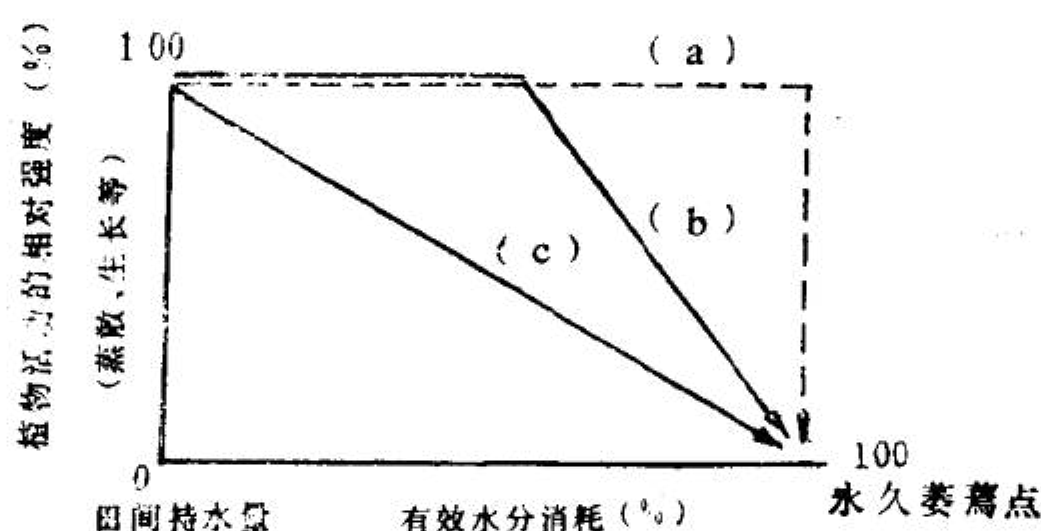



图4.14 关于土壤水分对植物的有效性的三种传统的假设（图中→表示土壤水分有效性的变化）

性就减小；（c）土壤含水量减少，有效性也逐渐降低。

2. 土壤有效水的新概念

近年来，在评价土壤—植物—水分的相互关系时，土壤有效水的经典概念发生了根本性的变化。对于一个动态系统来说，象土壤水分常数只是水分静态的概念。事实上，水是几乎不停地运动着的，其通量与方向都在变动着。水分对植物的有效性也并非只是含水量的函数。植物吸得的水量与速率既与根系从其接触的土壤吸取水分的能力有关，又与植物蒸腾要求根系供应水分的性能有关。而这些又决定于：（1）植物的特性：根系密度、根深、根部伸展速率以及植物生理吸水力，使它能不断地从土中吸收所需要的水分，以免萎蔫。（2）土壤的性质：导水率、水分扩散率、基模吸力与土壤湿度之间的相互关系。（3）微气象条件，它制约着植物的蒸腾，也为了保持其含水程度所必须的水量。

（二）植物根部吸水过程

当植物根的水吸力大于土壤水吸力时，土壤就向根部供应水分。根从土壤吸取水分之后，与根部接触的土壤水的吸力就上升，并趋向于与根部吸力水取得平衡。土壤中出现吸力水梯度朝向与根部直接接触的土壤，有效的水分流向根部土壤。这种土壤中水的运动是植物水分收支平衡中一系列过程中的一环。

假定用无限长的、具有固定半径和吸水特性的圆筒来模拟典

型的根，假定流向根部的水分运动是辐射流，则适用于这种流动的方程是：

$$\frac{\partial\theta}{\partial t}=\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(rD\frac{\partial\theta}{\partial r}\right) \tag{4.20}$$

式中，$\theta$是土壤湿度的容积百分比，D是水分扩散率，t是时间，r是到根轴心的径向距离。假定在根的表面，通量固定不变，加上如下的初始与边界条件：

$t=0$ 时，$\theta=\theta_0$，$\phi=\phi_0$

$t>0$ 时，$r=a$，$q=2\pi ak\frac{\partial\theta}{\partial r}=2\pi aD\frac{\partial\theta}{\partial r}$

式中，a是根的半径，$\phi$是基模吸力，k是导水率，q是单位根长的吸水速率，设k与D为常数，得出的解如下：

$$\phi-\phi_0=\Delta\phi=\frac{q}{2\pi k}\left(\ln\frac{4Dt}{r^2}-r_e\right) \tag{4.21}$$

式中，$r_e$是欧拉常数。(4.21)式表明：吸力梯度与吸水速率成正比，但与导水率成反比。对给定一点的水吸力的路程，将随时间的平方根而递增。

事实上，由于根生长系统的复杂性，根部条件的变化，当前要用数学方法描述吸水变化还是很复杂的。

（三）土壤水分对作物产量的影响

土壤水分的多少对于作物最终产量的影响，因作物、品种而异。每种作物、品种都有其最适土壤水分含量，生长于最适土壤水分条件下往往产量最高。表4.6表明抗旱性最差的品种，要求的土壤含水条件高，在田间持水量的75%时能获得最高产量，水分含量低，其产量还不到最适水分时的三分之一；对于抗旱品种，则生长于土壤湿度为田间持水量的60%产量最高。它们都是生长于各自最适土壤水分条件下的各品种产量，需水多、不抗旱的品种往往产量较高。

作物在不同阶段对于水分的要求不同，对水分的敏感程度也

**表4.6 生育于不同土壤水分条件下的小麦产量**

**(Koleuhov, 1925)**

| 品种抗旱能力 \ 土壤湿度* / 产量克/每盆 | 30% | | 60% | | 75% | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 总产 | 麦粒产量 | 总产 | 麦粒产量 | 总产 | 麦粒产量 |
| 抗旱差 | 19.5 | 5.7 | 27.9 | 9.7 | 43.0 | 19.0 |
| 抗旱较差 | 22.8 | 8.2 | 33.0 | 13.0 | 32.0 | 14.0 |
| 抗旱中等 | 26.3 | 8.6 | 46.1 | 19.7 | 28.8 | 11.3 |
| 抗旱较强 | 31.3 | 11.2 | 33.7 | 12.5 | 22.9 | 6.9 |

* 土壤湿度以田间持水量的百分比表示。

有差异。一般小麦在小花分化期土壤水分条件对产量性状的影响最大（表4.7）。表4.8表明，缺水条件下粒重是对照的68%。

**表4.7 小麦小花发育不同时期缺水对产量性状的影响**

**（王沅，1982）**

| 缺水时期 \ 产量性状 | 穗粒数 | 结实率(%) | 千粒重(克) | 穗重(克) | 穗数(万/亩) | 产量(斤/亩) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 小花分化期 | 33.55 | 72.3 | 41.7 | 1.40 | 32.1 | 578 |
| 小花两极分化期 | 36.05 | 85.5 | 39.7 | 1.41 | 32.0 | 614 |
| 开花结实期 | 36.00 | 71.4 | 36.4 | 1.31 | 39.5 | 635 |
| 正常供水 | 39.90 | 79.6 | 35.6 | 1.42 | 34.6 | 621 |

**表4.8 灌浆期不同土壤湿度对产量影响**

| 产量 \ 克/10株 \ 土壤湿度* | 70% | 50% | 35% | 25% |
|---|---|---|---|---|
| 籽粒量（克/10株） | 14.40 | 14.24 | 13.23 | 9.77 |
| 相对粒重（%） | 100 | 98 | 92 | 68 |

* 土壤湿度以田间持水量的百分比表示。

## 二、作物的需水量

### （一）作物需水量

水分对植物的物质生产影响，取决于大气中的湿度、土壤含水量。作物需水量是指生产1克干物质所需的水量。以植物在整个生长期或某一个发育时期内所吸收的水分总量与该时期生产的总干物质量的比表示，即以植物生理中的蒸腾系数作为需水量。根据蒸腾系数，便可找到作物抗旱性与需水量之间的规律，蒸腾系数越低的作物，越是适于干旱地区。但蒸腾系数不是稳定的数值，作物不同，蒸腾系数不同（表4.9）；土壤湿度不同，作物

**表4.9 各种植物的蒸腾系数**

| 种类 | 植物名称 | 蒸腾系数 | 种类 | 植物名称 | 蒸腾系数 |
|---|---|---|---|---|---|
| 禾本作物 | 高粱 | 322 | 阔叶 | 黄瓜 | 713 |
| | 玉米 | 368 | | 菜豆 | 682 |
| | 小麦 | 543 | | 豌豆 | 778 |
| | 燕麦 | 593 | | 蚕豆 | 794 |
| | 水稻 | 710 | | 向日葵 | 705 |
| 阔叶 | 麦 | 1016 | 杂草 | 马齿苋 | 292 |
| | 马铃薯 | 636 | | 苍耳 | 432 |
| | 油菜 | 743 | | 白藜 | 801 |
| | 西瓜 | 600 | | | |

蒸腾系数也不同。小麦在土壤湿度田间持水量80%时，蒸腾系数为524，60%时为476，40%时为379，20%时为356。确切地说，蒸腾系数不是一个固定数值，而是一个范围。蒸腾系数不仅是作物用于生产有机物质消耗的水分，也与生长发育速度有关，并受生育期间大气湿度、土壤水分及温度等影响。所以蒸腾系数还不能表征物质生产与水分消耗之间的定量比例关系。蒸腾系数变动的幅度大，不能用于大田；它只表征作物对水分的喜好程度及利用率高低。玉米的蒸腾系数小于小麦，说明玉米利用水分的效率高于小麦，但并不能说明玉米需要的水分少于小麦。据测定，正

好相反，玉米一生中正常生长消耗的水分远比小麦多。以蒸腾系数表示需水量是不合适的。

植物需水量包括三个部分：①植物同化过程所需水量和植物体内含有的水分，这部分水分所占比例很小，仅占总量的0.15—0.20%，占蒸腾量的1—2%；②蒸腾耗水：蒸腾是生物与物理过程的综合，占耗水量的绝大部分，大田条件下，影响植物蒸腾的因子有植物的种类和品种类型、植株年龄、气象条件及土壤条件；③蒸发及田间渗漏。上述第一、二部分为植物生理过程所必需，称为生理需水；第三部分为非植物生理过程所必需，但却是植物生长环境条件形成中所必需，称为生态需水。

田间作物耗水量主要是针对大田农作物而言，在大田条件下，作物根系源源不断地得到水分供应，用于同化过程、蒸腾过程和作物表皮蒸发、土壤蒸发和渗漏的水分总消耗量，即包含生理需水和生态需水。

作物的生态需水可随农业技术措施的采用而大为减少，如农业上喷灌、滴灌、覆盖等。

作物一生中的需水量随着生育进程变化的，也随气象条件的变化而波动，但大致符合少—多—少的规律，一般在生长发育盛期，特别是营养生长与生殖生长并进时期，作物一方面要大量水

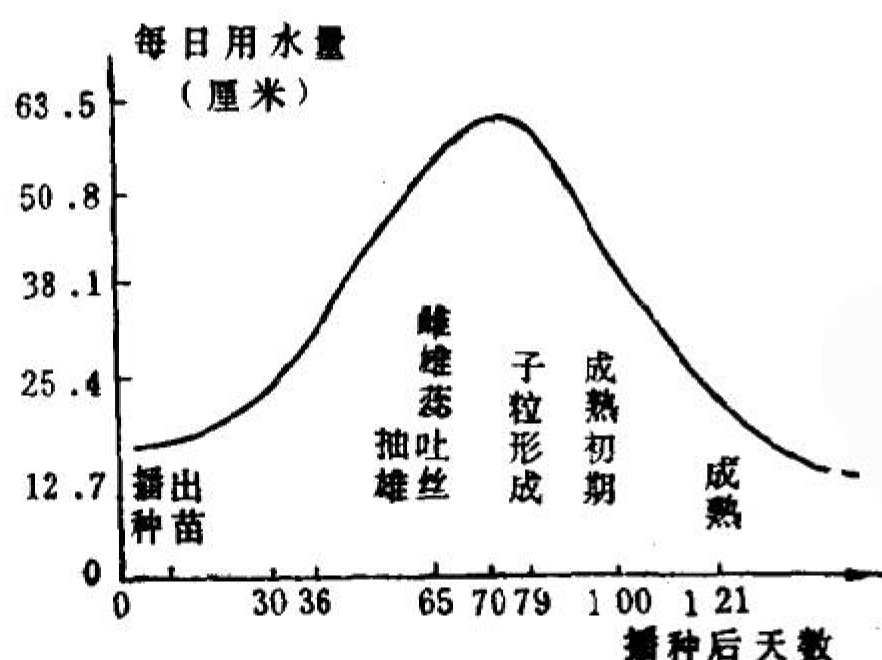



图4.15 玉米每日的用水量

分供应光合作用形成合理的群体，另一方面生殖器官对于水分特别敏感，需水量要小。图4.15是玉米每天的用水情况。表4.10是我国几种作物各生育时期的大致需水情况。

表4.10 主要作物的需水量

| 作物 | 生育时期 | 阶段需水量占总需水量的% | 适宜土壤水分占田间持水量的% |
|---|---|---|---|
| 水稻 | 返青—分蘖 | 17 | — |
| | 分蘖—拔节 | 29 | — |
| | 拔节—抽穗 | 16 | — |
| | 抽穗—乳熟 | 15 | — |
| | 乳熟—成熟 | 23 | — |
| 冬小麦 | 幼苗 | 5 | 60—80 |
| | 分蘖—拔节 | 15 | 60—80 |
| | 拔节—孕穗 | 19 | 70—80 |
| | 孕穗—抽穗 | 25 | 70—80 |
| | 抽穗—开花 | 6 | 80—85 |
| | 开花—成熟 | 30 | 60—80 |
| 春小麦 | 幼苗 | 13 | 60—80 |
| | 分蘖—拔节 | 10 | 70—80 |
| | 拔节—抽穗 | 35 | 75—80 |
| | 抽穗—灌浆 | 24 | 70—85 |
| | 灌浆—成熟 | 18 | 60—70 |
| 高粱 | 幼苗 | 20 | 60—75 |
| | 拔节 | 30 | 65—75 |
| | 抽穗 | 25 | 60—70 |
| | 灌浆 | 20 | 60 |
| | 成熟 | 5 | 60 |
| 大豆 | 幼苗—分枝 | 9 | 60—70 |
| | 分枝—开花 | 7 | 60—70 |
| | 开花—结荚 | 35 | 70—80 |
| | 结荚—灌浆 | 32 | 60—65 |
| | 灌浆—成熟 | 17 | 60—65 |

## （二）作物的水分临界期和关键期

农作物在其生长发育的不同时期，对水分的敏感程度是不一样的。对水分最敏感的时期，也就是由于水分的缺乏或过多，对产量影响最大的时期，称为某作物的水分临界期。几种主要作物的水分临界期如表4.11。

**表4.11 几种主要作物的水分临界期**

| 作物 | 临界期 | 作物 | 临界期 |
|---|---|---|---|
| 冬小麦 | 孕穗到抽穗 | 大豆、花生 | 开花 |
| 春小麦 | 孕穗到抽穗 | 向日葵 | 花盘形成到开花 |
| 水稻 | 孕穗到开花 | 马铃薯 | 开花到块茎形成 |
| 玉米 | “大喇叭口”期到成熟 | 甜菜 | 抽苔到花始终 |
| 高粱、谷子 | 孕穗到成熟 | 西红柿 | 结实到果实成熟 |
| 棉花 | 开花到成铃 | 瓜类 | 开花到成熟 |

临界期不一定是植物需水量最多的时期，需水量的多少与对产量影响的大小，是不同的概念。

在作物水分临界期内，如降水量较适宜，其保证率也高，则此时并不一定是当地影响产量的关键时期。如在另一个时期，一方面作物对水分也相当敏感；另一方面，正好遇上当地降水条件经常出现不适宜（过多或过少），这一时期是当地水分条件影响产量的关键时期，称为作物的水分关键期。关键期是综合考虑了作物的特性与当地农业气象条件两方面的因素而形成的概念。故某地作物水分的关键期与临界期可能一致，也可能不一致。

一般作物的水分临界期多与花芽分化时期相联系。不同作物与品种，其临界期之长短不相等。临界期时间较短的作物，品种适应不良水分条件的能力较强，临界期拉得很长，容易遇上不良条件的危害。

水分临界期是一个相对的概念，不能因临界期的水分供应重要，就忽视其它时期的水分供应。应了解作物不同时期的需水规律，同时研究本地降水与土壤水分随季节变化的动态，研究两者

的配合情况，将各生育时期苗情与水分情况逐段对照分析，以鉴定作物的水分供应状况，提出合理管水的田间措施和灌溉方案。

（三）影响需水量的因素

1. 气象因素的影响

凡影响植株蒸腾和棵间蒸发的因素，都直接或间接地影响需水量。气象条件是影响植物需水量的主要因素，不仅影响蒸散速度，也直接影响植物生长发育。

太阳辐射，相对湿度以及空气运动都是影响水分蒸散的气象因素。太阳辐射给水分蒸发提供了必要的能量，它通过直射植物体和土壤而影响蒸散量，也可通过它对空气的加热和流通而间接影响蒸散量。光照还能促使气孔开放，减少内部阻力，蒸散加快。

大气相对湿度在蒸散方面起重要作用，如果大气中水蒸汽处于饱和状态，蒸散必然很小，因为蒸散面与空气之间保持着平衡，如发生蒸发，必须排除湿空气。

空气流动可把水蒸汽从蒸发面吹走。风使蒸发面的饱和空气受到干扰，蒸发面上部的饱和空气被干空气所取代。实际上，蒸发面以上风速的变化比蒸发面表面风速的变化更为重要。风的作用可使空气和蒸发面之间形成气压梯度从而影响蒸发量和蒸发速度。

通过表层空气向上产生的水汽流取决于水汽压的垂直梯度和水汽与空气混合的状况。此混合比不取决于风速，而取决于蒸发面上某高度的风速变化。土壤表面状况能影响土表上部的风速变化。通常风速加快，蒸发也大，但它受空气温度和相对湿度的影响。

2. 植物因素的影响

植物生态生理的差别都影响到需水量，生态方面如植株高度、形态、根部生长情况、植物群体的密度等；生理方面影响则较复杂。内部面积大而湿润的叶片，细胞内蒸发进入细胞间隙，

并以气态水通过气孔散发到叶子外面。除非植物已达萎蔫程度，叶片内的相对湿度才小于98%。叶片湿度大，可保持叶子和大气之间的水汽压梯度，促进植物中水分的运动。当其他因素稳定时，蒸腾量将随着叶片和大气之间气压梯度的急剧升降而变化。植物吸收太阳辐射后，叶子和空气温度增高和叶片内的水汽压也增大。

根系扎入土壤较深，植物可吸收较深层土壤水分用于蒸腾。然而经过土壤和植物移动到叶子中去的水分不总是能够满足蒸腾的需要，因此，叶子可能暂时处于萎蔫状态，土壤吸力较高时，萎蔫程度较严重。但在辐射量大、水的吸力相对低的情况下，植物也缺水，这种现象多发生在夏季的正午。

3. 土地面积大小的影响

需水田块的大小，在一定程度上能调节失水量，特别是当大块干地包围着一小块湿地时，这种现象尤为突出。在湿润地被干得而没有蒸发的地块包围时，会出现“沙漠中的绿洲”，这种现象在山区耕地面积分散的旱地比较常见。面积大小对蒸发的影响见表4.12。表中蒸发是在一个假设完全干燥的地面所包围的湿润地上空160厘米处，温度为30℃，水汽压为800帕时所得的数据。其中辐射，风的梯度和土壤的粗糙度是一致的。在湿地上空160厘米处温度和蒸发量随土地面积大小而变化。干热空气穿过湿润地区所产生的热平流，随着湿润地区面积的增大，其影响渐减，这是因为随着空气逐渐变湿，使水蒸汽含量增加，温度减低的缘故。

**表4.12 面积大小对蒸发的影响**

| 地　　段 | 160厘米上部温度（℃） | 蒸发（厘米/小时） |
|---|---|---|
| 1.8米²的贮水池 | 30.0 | 0.45 |
| 15米²小区（湿） | 28.6 | 0.26 |
| 91米²大田（干） | 23.8 | 0.19 |
| 1600米²大田（干） | 20.0 | 0.13 |

田间裸露土壤，为蒸发提供更多的能量。例如宽行高粱地裸露部分提供大约21%的外加能量用作加热土壤，增强蒸发。

来自临近地区干热空气所造成的边界平流，对于上风处的田间边沿地带的效应是大的。上风处田间产生蒸散所引起的水分损失最严重，但当空气中的水汽聚集变冷时，蒸散减弱。这种风在大块地上所产生的蒸散量要比无这种风地带所产生的蒸散量大。

4. 能量平衡

由蒸腾、蒸发引起需水量变化也取决于其过程中的能量多少，净辐射用于蒸发、加热空气或加热土壤。能量的分配，主要取决于蒸发过程可利用的水量。多余的一部分辐射能转为蒸发和热量。同时当土壤表面比较湿润时，热量很小。土壤干燥，水分运送到土壤表面本身就成了蒸发的限制因子；土壤表面潮湿时，则限制着蒸发的是可利用的能量。土壤干燥，蒸发量低，绝大部分的净辐射用于加热空气。当水分用于蒸腾时，植物冠层平流热增加了蒸散的损失，这时来自潮湿地的蒸散可能高于净辐射。额外的能源通常是在蒸发量较低，显热大而较干燥的上风区。

土壤、植物和大气形成了一个输送水分的系统，如水分蒸腾、易位、吸附以及土壤可利用水等都属于水分输送系统的各个方面。土壤水位高便能产生大的蒸散量，但是，在水分限制的条件下，植物产生的干物重量是蒸散量的函数。只要水分限制植物生长时，蒸散和植物产生干物质间的相关性就比较高。

## 三、大气水分与作物生长发育

### （一）降水对作物的影响

1. 降水与土壤水分贮存

土壤水分贮存主要是由大气降水提供的。渗入土壤的水分多少与降水强度有很大关系。另一方面也决定于土壤的性质。

农业气象中常用“透雨”来分析降水的有效性和对土壤水分的增墒程度。所谓透雨就是在天气比较干旱的条件下，一次降水过程可以使当地的农作物在一个较长的时期内得到为维持作物正

常生长所需要的水分，这样的一次降水过程称为透雨。具体要多少毫米降水才达到要求，则要满足两个条件，一是降水量必须超过某一深度范围，使土壤达到作物的适宜土壤湿度；二是降水渗透进土壤深度大于作物所要求的适宜土壤湿度的深度。以华北地区春季透雨指标为例，在确定时，应考虑下列因素。

（1）作物对土壤水分的要求。根据春播作物对水分要求可分为对水分要求高的小麦拔节期和棉花播种期，以及对水分要求较低的粗粮作物（玉米、高粱、谷子、马铃薯等）的播种期、苗期和棉花苗期。棉花从播种到出苗期间，0至20厘米土层的含水量为田间持水量的70%或稍多为宜，棉花苗期在30至40厘米土层中含水量为田间持水量的60%为宜。冬小麦拔节—抽穗期为需水临界期，土壤湿度低于田间持水量的65%将影响产量。

（2）土壤水分运动和作物对土壤水分的吸收。从作物对土壤水分吸收的角度分析，田间持水量到稳定凋萎点之间为有效水分。但是当土壤湿度低于毛管断裂湿度（约占田间持水量的65—70%）时，土壤水分的活动性就显著地降低。作物从根毛附近的土壤中吸取水分后，若水分得不到补充，则它吸收的水分将逐渐减少，不能满足作物蒸腾的需要，影响作物的正常生长。

（3）土壤深层的接墒情况。华北春季耕作层以下的土层中，土壤含水量一般变化较小，而耕作层受气象条件影响较大。为满足耕作层与其下层的水分交换，要求耕作层以下临近土层的湿度接近耕作层在降水后的湿度，例如耕作层（0—20厘米）与其下层（20—50厘米）在降水后都能保持在田间持水量的65—70%以上，可以认为耕作层与整个土层接墒较好。

（4）蒸发的水分消耗。春作物从播种至出苗期间及冬小麦在拔节后较长的时期中，蒸发（散）主要从耕作层及其邻近的下层消耗水分，可以估算：春播作物10天的蒸发量为10—20毫米，而拔节期的冬小麦则为30—40毫米。

耕作措施也改变着降水与土壤水分的关系，夏季浅耕可以消

灭杂草以保存土壤水分。但部分半干旱地区夏耕期间仅能贮存少量水分，大部分水分是在9月中至翌年5月中旬贮存的。美国三大平原最多的贮水量是从4月中至6月中旬夏季降水中得到的。美国平原地区也常以休闲方式提高土壤水分贮量，称为休闲效应。

2． 降水强度和降水量对作物的影响

降水也是灌溉水的来源；对无灌溉条件的旱地农区，降水更是决定作物产量的主要因子之一。我国气候特点之一是东部沿海的降水多于同纬度的西部地区，因而大面积的农业高产区主要分布在东部地区。

相同的降水量，强度不同，就有不同效果。如雷雨、阵雨等强度过大，持续时间短，土壤的入渗速率小，径流大，易形成渍涝。且降雨强度过大，易造成作物机械损伤。同量的降雨如雨日多而强度小的连阴雨，则间接影响大，带来阳光不足，易致作物倒伏与病害、光合产物不足，形成秕粒、产量低，品质差。阴天的光合有效辐射能低，在低云云量达9—10时，光合有效辐射不足0.04—0.08焦/厘米$^2$·分，植物的光合强度趋于零。例如夜间和白天的人工降水试验结果，夜间人工降水的春小麦产量为30公担/公顷，蛋白质含量17.55%，面筋含量35.6%，而白天人工降水处理后春小麦的产量。蛋白质及面筋含量分别为25.0公担/公顷，16.3%，和34.0%。这是由于白天人工降水的细小水滴使太阳辐射强度大为减弱，导致籽粒品质下降，而“夜间下雨白天晴”则有利于形成好的产品品质。

一定的降水适当地分散降落效果更好。特别是热雷雨、夜雨最有利于植物的生长发育。因为热雷雨多在傍晚降落，夜雨则在夜晚降落，既保证了植物水分供应，又使作物有充足的光合作用时间。热雷雨还伴有闪电现象，它分解大气中的氮，而给作物带来氮肥。

降水除改变土壤水分含量外，还改变大气干湿状况，比灌溉湿润的面积大而均匀，故有“横水不如竖水”之说，即人工灌水

不如天然降水。

3． 降水时间分配对作物的影响

降水的季节分配涉及到两方面，一是降水的分布与温度条件是否配合，如果水热同季，热量条件保证水分条件得到充分利用，对植物极为有利；二是降水的时间分配与植物对水分的需要是否一致，降水效应随植物发育期不同而有很大变化。

水分和温度都是气候的重要资源，它们配合得如何，不但在很大程度上决定着当地气候资源的利用，也影响到水文、植被、土壤等自然景观。例如，在我国西北的干旱区，夏半年的温度是很高的，但水分不足，便限制了温度资源的利用。只在少数能够引水灌溉的地方，才有农业。在青藏高寒区，很多地方水分是充足的，湖泊、沼泽随处可见，但温度过低又限制了水分资源的利用。只在某些海拔较低，背风向阳的河谷，才能种植喜凉作物。在东部季风区，水分和温度配合较好，温度高时降水多，温度低时降水少，因此气候适宜，农产丰富。但季风进退的迟早、强弱每年不一，所以也有旱涝、高、低温等灾害。

降水还有一定滞后效应，特别在北方地区，干湿季节分明，雨季的降水量，在土壤中贮存，为以后各季作物所用就显得更为重要。谚语有"麦收隔年墒"、"三伏有雨多种麦"，说明了雨季降水滞后效应的重要。

降水分配与作物需水是否发生矛盾，主要决定于农作物在生长期间需水量是如何随生育期变化的，以及需水量多少。另一方面，降水是怎样分布的，是否与作物需水要求一致以及降水量能否满足作物的需水要求。图4.16是北京地区冬小麦生育期间需水量与降水量的对比关系，可见在冬小麦返青后，降水量不能满足需水量的要求，所以春雨极为重要。在4月上旬拔节前，需水量还较小，稍有灌溉，就能基本满足需要，4月中拔节后即开始幼穗分化，5月中旬进入抽穗、开花及籽粒形成期，需水量急剧增多，是冬小麦需水临界期。水分满足与否直接关系到成穗、粒数

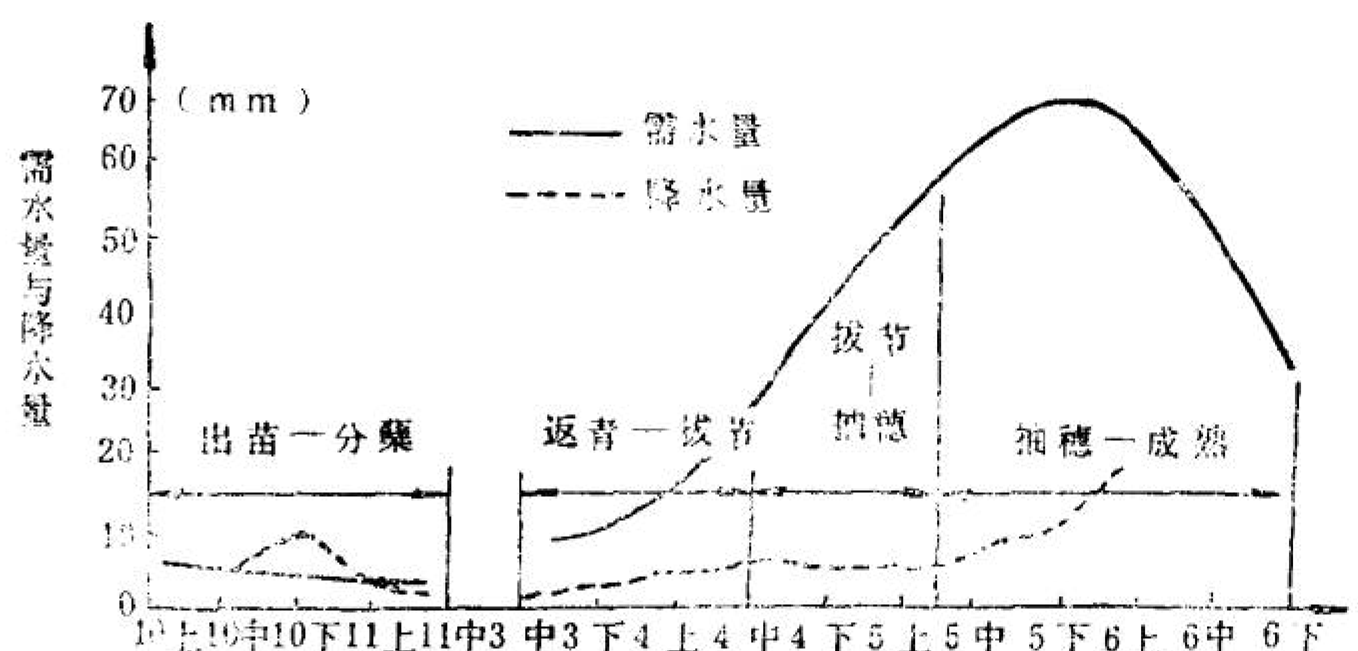



图4.16 冬小麦全生育期需水量、降水规律
（裴鑫德等，1983）

与粒重，因此春雨对于小麦的产量有决定性的影响。

按降水对冬小麦产量的影响，又可分为早春雨（3月上旬至4月上旬）及春雨（4月中至5月下旬）。北京地区春季雨量较少，而4月11日至5月3日关键时期的雨量只占年雨量的8%，且年际变率较大。北京历史上4至5月雨量最多时可达154.8毫米（1964年），最少只有5.7毫米（1976年），相对变率达61%（早春雨）和56%（春雨），引起春旱。春雨变率大是北京地区冬小麦产量不稳定的主要原因。此时气温迅速升高，风速又大，降水量小，无雨和小于10毫米的降水占70—90%，降水消耗很快，因此春旱季节大于10毫米降水比同量的伏雨对冬小麦更为有利。

4. 降水对生长的直接影响

降水天气影响到辐射强度，降水带给土壤充足的水分是降雨的直接影响。

降雨对干物质生产也有直接影响。试验证明，雨天，用透明塑料棚在室外设降雨区和遮雨区（表4.13），比较干物质生产速度，尽管降雨区比遮雨区光强度强10%，但玉米、甘薯、菜豆干物质生产速度比遮雨区低30—50%。降雨使生产速度下降的原因，

表4.13　在雨日作物干物质生产

| 日期(日/月) | 降水(毫米/小时) | 太阳辐射(卡·厘米²/小时) | 平均气温(℃) | 作物种类 | 处理 | 干物质生产速率(毫克/厘米²·小时) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 21/5 | 2.9 | 5.9 | 17.5 | 玉米 | 非降雨区<br>降雨区 | 0.021<br>0.006 |
| 27/6 | 9.0 | 3.5 | 19.0 | 玉米 | 同上 | 0.042<br>0.032 |
| | | | | 菜豆 | 同上 | 0.031<br>0.015 |
| 17/7 | 0.6 | 16.0 | 22.8 | 甘薯 | 同上 | 0.099<br>0.068 |

可能是雨对叶片的直接作用。雨水覆盖叶面，气孔关闭，二氧化碳交换受到抑制；另一方面，雨水的作用，同化产物流失，阻碍了干物质的累积。

降雨对叶片的扩展也有影响（表4.14），在降雨日，降雨区菜豆初生叶和原有叶的扩展量，叶长、叶宽都比遮雨区生长速度快，6小时的扩展量为遮雨区的两倍以上。雨的影响也随光的有无而异。当光照时间变长，降雨处理后叶片扩展比遮雨区的增大得快。如果连续24小时光照，降雨处理后叶扩展量为遮雨区的三倍。但第二日处理的扩展量急剧下降，三日后两区扩展几乎相同。这主要是植物组织内含水量增加的关系。物质流失引起植物体内成分变化以及植物生长调节物质的分解，详因还在研究之中。

（二）空气湿度与农作物关系

1．空气湿度与农作物关系

空气湿度与农作物生长发育的关系主要表现在空气湿度影响植物蒸散以及植物组织中水分平衡的变化。相对湿度小一些，植物蒸腾较旺，吸水较多（图4.17）。在土壤水分充足的条件下，蒸腾旺盛可增加植物对水分和养分的吸收，加快生长，所以，在一定程度上，空气相对湿度较小对植物是有利的。在空气饱和湿

**表4.14　雨日菜豆叶的扩展**

| 叶位 | 日期（日/月） | 降水量（毫米） | 处理方法 | 叶长（毫米） 开始时长度 | 叶长（毫米） 增加量 | 叶宽（毫米） 开始时宽度 | 叶宽（毫米） 增加量 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 初生叶 | 28/5 | 5.0 | 对照 | 40.7 | 1.0±0.22 | 36.2 | 0.7±0.16 |
| | | | 降雨区 | 40.2 | 2.0±0.22 | 33.6 | 1.8±0.09 |
| | 13/10 | 4.8 | 对照 | 45.9 | 1.3±1.9 | 40.0 | 0.9±0.26 |
| | | | 降雨区 | 45.4 | 2.5±0.21 | 40.8 | 1.9±0.11 |
| 第一叶 | 28/5 | 5.0 | 对照 | 52.8 | 1.8±0.25 | 30.6 | 1.3±0.12 |
| | | | 降雨区 | 53.4 | 2.8±0.33 | 31.8 | 2.0±0.24 |
| | 12/6 | 18.0 | 对照 | 64.0 | 0.3±0.25 | 40.0 | 0.0 |
| | | | 降雨区 | 64.3 | 0.2±0.22 | 40.2 | 1.4±0.22 |

* 对照为遮雨区。

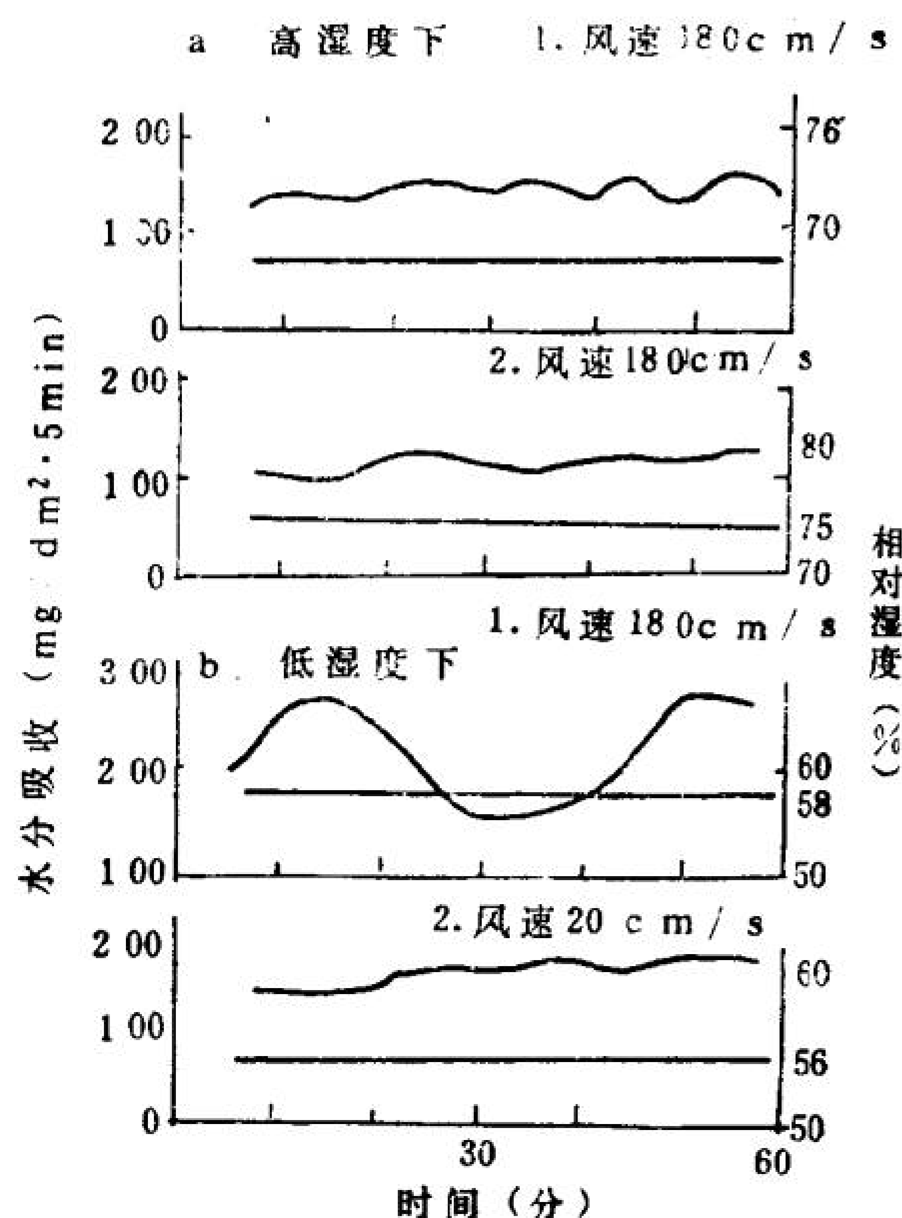



图4.17 不同温度、风速与黄瓜吸水的关系

（光强为2.1焦/厘米²·分，温度为25℃）

度下植物的生长受到抑制，谷物籽粒的灌浆速度也降低，这是由于湿度大抑制了蒸腾的缘故。相对湿度高，还影响作物成熟时的脱水过程，延迟收获，降低产品质量，且不易贮藏。反之，相对湿度小可能引起大气干旱，特别是在气温高、土壤水分缺乏的条件下，影响更为严重。它破坏植物的水分平衡，使水分入不敷出，阻碍生长，造成减产。

2. 空气湿度与光合作用

有人认为，在棉花幼龄植株中，空气湿度越低，二氧化碳吸收量越多，并且推测这是由于叶温降低所致；与此相反，另有人观察到棉花着生的单个叶，随着湿度降低（饱和差增大）光合作用强度也相应降低（图4.18）。矢吹和宫川观测到，当风速减弱

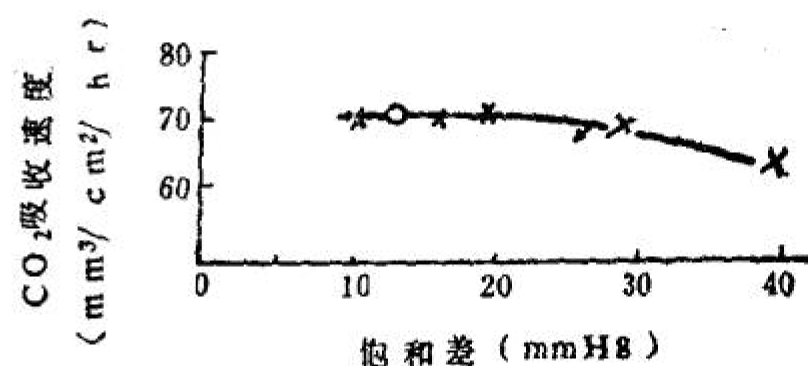



图4.18 光合作用与水汽饱和差的关系
(Bierauizen和Slatyer, 1964)

时，黄瓜几乎看不到湿度的影响，但是当风速增大时，光合作用强度因湿度而有显著差异，并随湿度的减少而降低。这一方面与气孔开闭程度有关，另一方面，蒸腾作用随空气湿度而有显著变化（Nerins等，1970），但光合作用则完全不受影响(图4.19)。

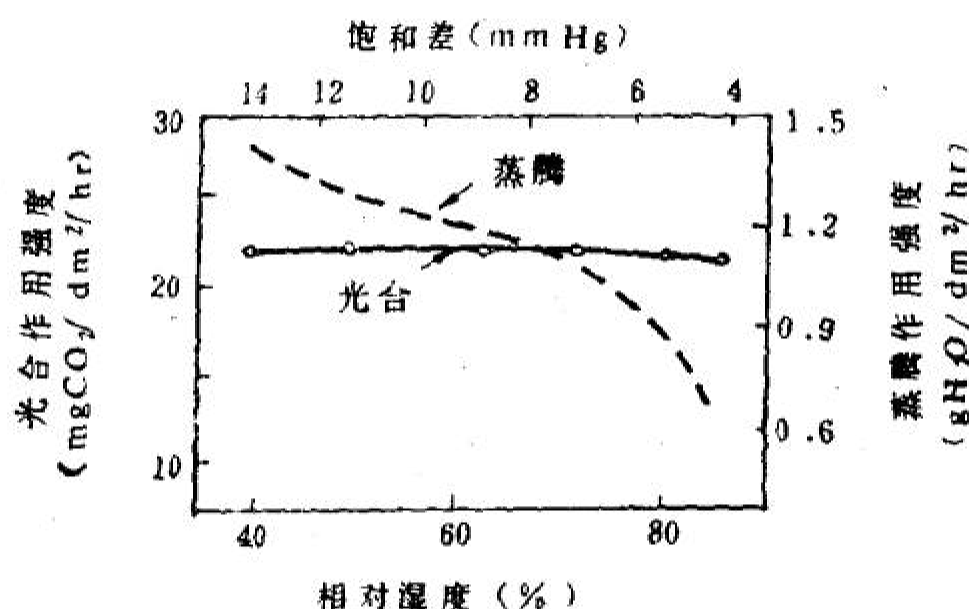



图4.19 光合作用、蒸腾作用与空气湿度的关系
(Neris和Loomis, 1970)
棉花叶温为23℃，光强度为2.1焦耳/厘米²

综上所述，在空气湿度与光合作用之间，某些情况下呈正相关，而某些情况下又呈负相关。这是因为湿度对光合作用的影响是间接的，也因其它因子所处状态而有各种不同表现。

（三）雪与农业生产

降雪对农业是有意义的。在降雪的初期和后期，日平均气温多在0℃以上，因此这时候落到地面的雪花一般不会存在，往往随降随化，或在1—2天融化完毕。当地上积雪面积达地面的1/2以上时，就称地面有积雪现象。对农业生产有意义的是稳定积雪层，所谓稳定，至少有30天以上的连续积雪期，才算有稳定积雪。雪是良好的绝热体，稳定积雪的持续长短和厚度，常作为越冬作物是否安全越冬的一个条件。

雪层是不良导热体，在严寒的冬季，地面上覆有5厘米以上的稳定积雪，就会产生明显的保温作用。20厘米的阵雪能基本满足春播作物及冬麦返青的用水。此外，冬季牧场牲畜饮水，主要依靠积雪。

对于冬季积雪时间长，雪层丰厚的地区，积雪的农业意义有：①保温作用。据新疆自治区气象局乌拉乌苏农业气象试验站的观测，当最低气温为－30℃时，10厘米厚的雪层可使土壤3厘米深处（即冬小麦分蘖节处）的最低土温，比空气的最低温度高17℃，积雪深度超过20厘米时，可高21℃。积雪还可使土壤冻结不深，如在积雪丰富的盆地，如果能在土壤封冻前，形成稳定积雪，土壤可以不出现冻层。因此越冬作物覆上雪被，在漫长寒冷的冬季就能免遭冻害；②积雪能增加土壤水分。春季缺水是西北和华北农业生产中最为突出的问题，而冬季的积雪，在一定程度上可以缓和春旱的矛盾。由于冬季蒸发量不大，融雪水绝大部分被农田利用，冬季10厘米的积雪，每亩地大约能获得10多立方的水量，水量虽不大，由于积雪消融慢，流失很少，大部分都能渗入到土壤里贮存起来。

雪也有危害，冬季积雪较少或积雪过多，使作物死亡和受害。在牧区，可形成黑灾或白灾。

（四）露

露在某些干旱地区和干旱时期，对植物有着重要作用，是某

些植物生存的主要水分来源。重的露水可在一段长的时间内抑制蒸发，等于等量地节省了土壤水分的消耗；露水还可能被植物直接吸收，改变内在的水分平衡。植物夜间因露水而达到水分饱和，既利于夜间减弱呼吸作用，又有利于早晨的光合作用；但凝露时间的长短对真菌病害的发生、发展关系极大。某些病菌只有在叶片被液态水覆盖时，才能穿过叶的气孔；还有的病菌要求在有水时，孢子才发芽。对于水果，如果表面上有大量露水，易形成疵点，有损水果的品质。

作物表面凝结露水，其水汽来源于上下两个方面，通过湍流传导以补充凝露之消耗。据伯雷奇（S.W.Burrage）观测麦地水汽压梯度表明，60厘米高度以上“降露”，水汽来源于上面，60厘米以下水汽来源于土壤蒸发，前者之量为后者两倍。

凝露时，作用面辐射降温，一般平均每晚1平方厘米叶面辐射放出251.2焦尔热量，由此可引起降温，只够0.5毫米的露量，这是每天夜晚凝露量的上限。

## §5 不利水分条件对农业生产的影响及其调节

### 一、水分过少的危害

#### （一）干旱

1. 干旱的概念

久晴不雨就要发生干旱，它常发生在干季（降水比较少的干燥少雨季节）或干期(无雨日数持续一个较长时段)之内。多数情况下伴随着大气高温、低湿，有时还伴有风，此时蒸散强烈，土壤供水不足，生物体内水分平衡破坏，严重时则导致生物体死亡。

干旱是一种世界性的主要农业气象灾害，几乎在任何地区，任何时间都可出现，而且一旦出现，受害面积就很大，危害性也往往很严重。

气候干旱与农业干旱，以及干旱气候与干旱不是同一个概念。一般干旱地区与干旱气候是对湿润地区与湿润气候而言，气候干

旱更是一个气候学概念。农业干旱简称干旱，是农业气象现象，是一种灾害性天气，在湿润或半湿润地区也可发生。

2． 干旱的类型及其危害

按干旱的成因可把干旱分为以下三类：

（1）土壤干旱是指土壤水分不能满足植物需要的一种干旱现象。久晴不雨，长期大气干旱是土壤干旱的主要原因。一般在发生土壤干旱时，气象要素仍有正常的日变化，常有露形成。这样，白天植物的水分平衡虽有破坏，晚上却可得到一定程度的恢复。这种干旱的危害是逐渐累积起来的。

（2）大气干旱是指大气中的干旱现象。这时空气十分干燥，加之高温，有时并伴有一定的风力。土壤可能并不缺水，但作物蒸腾速率远大于根系对水分的吸收，作物体内水分收支不平衡，水分状况恶化，造成减产，严重时甚至整株枯萎死亡。发生大气干旱时，气象要素的日变化是不正常的，往往昼夜持续高温低湿，使得植物在白天丧失了大量水分后，夜晚不仅得不到补偿，有时仍要继续消耗水分，加剧了干旱的危害程度。当大气干旱出现时，若伴有风，称为干热风。干热风实际是大气干旱的一种特殊形式。

（3）生理干旱是指植物不是因土壤缺水而出现的干旱现象，一般是指土壤溶液含有大量盐类或其他原因，植物根系吸水困难，甚至不能吸水，植株继续蒸腾所导致的干旱。通常是由于根分布层的土壤温度过高、过低，土壤通气不良，土壤溶液浓度过高及土壤中累积了某些有毒化学物质等，限制了根系对水分的吸收而造成的。土壤温度过低而引起的生理干旱，称为冷旱。

按干旱发生的季节，可把我国干旱分为春旱、夏旱、秋旱以及冬旱。

（1）春旱指发生在春季3—5月的干旱。它的特点是：温度不高，相对湿度低、缺雨或少雨，并常有使土壤变干的冷风，我国黄、淮流域以北地区以及东北最常发生，西北和长江上游也有出现。

华北平原春季雨量常不足全年的10%，蒸发量却及全年的35%以上，而雨量的相对变率高达70%以上，因此春旱经常发生。

春旱首先影响春播，使幼苗出土困难，甚至不能出苗，造成缺苗断垄或者减少分蘖。也影响越冬作物的返青、生长。

（2）夏旱（也称伏旱）指发生在6—8月的干旱。其特点是：太阳辐射强烈、温度高、相对湿度低、蒸散旺盛，我国长江流域，特别是湖北、江西、安徽、江苏等省最常发生。夏旱不及春旱之多，但对春播、夏播作物的危害一般比春旱严重。这时又正值作物需水较多，遇上长期无雨，干旱自然严重。

（3）秋旱指发生在9—11月的干旱。它的特点与夏旱相类似，但不及夏旱特点那样显著。可在广大地区发生，包括华中、华北和华南的许多地区，又以湖北、湖南、福建、江西、安徽等省最常发生。一般说，秋旱比春旱、夏旱更为经常。

秋旱发生时，晚熟春作物和大部分夏作物水分供应条件恶化，影响产量。它对秋播作物播种影响特别严重。

（4）冬旱指发生在12—2月的干旱。它的特点是我国冬季降水各地都很少，但秋播作物需水也少，在北方，（越冬植物停止生长）冬季土壤水分主要保证来年春播和越冬植物返青之用，因此冬旱本身对当时越冬植物基本没有影响。只有冬旱连着春旱，或者迎着秋旱，才加重春旱或者冬旱的危害性。但在华南南部，因作物仍在生长，冬旱却不时出现。

此外，还有几旱连着出现的情况，如伏秋旱、春伏旱，甚至春夏秋三旱相连，对作物的危害更加严重。

（二）干热风

1. 干热风的概念

干热风是指出现在温暖季节导致小麦乳熟期受害的一种干而热的风，是一种大气干旱现象。出现时，温度显著升高，湿度显著下降，并伴有一定的风力，使正处于乳熟期的小麦蒸腾加剧，根系吸水不及，灌浆不足，秕粒严重以至枯萎死亡。

干热风也称干旱风，是影响我国北方小麦高产稳产的主要农业气象灾害之一。华东地区称火南风，南洋风；黄淮地区称火风、旱风；甘肃河西走廊称热东风、烧风等等。现在我国统一定名为干热风。

2. 干热风的类型及其危害

在不同地区，不同的干热风天气过程中，温、湿、风三个因素各自所起作用的主次程度不全相同，危害情况也不尽同。据此，可将干热风天气分为以下三种类型：

（1）高温低湿型　其特点是干热风出现时急剧升温降湿，且持续高温低湿，所以热和干是这种类型干热风对小麦造成危害的主导因子，风的存在只是加剧了危害。它主要出现在小麦开花灌浆期间，是华北和西北小麦产区干热风的主要天气类型。

（2）雨后热枯型（雨后猛晴型）　其特点是雨后猛晴或雨后高温，主要危害小麦乳熟中、后期及腊热初期，使小麦茎，穗呈灰褐色，青枯，最后造成灌浆速度减慢，千粒重下降而减产。一般在一次降雨过程后，2—3天内若出现高温晴天，即会对小麦造成危害。在华北地区常发生于6月上、中旬，西北地区一般在6月下旬到7月上旬出现较多。

（3）旱风型　其特点是空气湿度低，风速大，因此风和干旱是主导因子。出现这类干热风天气时，一般有3—4级以上的西南风或西北风，多见于黄淮平原，尤以苏北、皖北更为多见。小麦植株危害症状主要因体内水分大量消耗而表现出从穗到叶、茎逐渐干枯的现象，千粒重明显下降。

**二、水分过多的危害**

（一）水涝

1. 水涝的概念

水涝是水灾和涝灾的通称。水灾是指河流泛滥或山洪爆发淹没了河流邻近的大片农田所造成的灾害。

涝害系田野积水难以迅速宣泄，影响生物生长的现象。1984

年8—9月，河南周口、驻马店、安徽阜阳等地区也曾因降雨过多而发生严重内涝，河南成灾面积达67万公顷左右，安徽60万公顷。

2． 水涝害的影响因素

（1）降水多且时间长，或降水过分集中是形成水涝的根本原因。我国许多地区夏季（6—8月）季风活动很强，雨水特别集中。例如黄河流域7—8月份降水量占全年的50%左右，华北平原甚至可达70%以上。夏季不仅雨水集中，而且多有暴雨，在短时间内使大量的雨水倾入江河湖泊，以致水位猛涨，泛滥成灾，在宣泄不畅，地势低洼的地区则积水成涝。在华南和东南沿海地区，台风盛行，带来的暴雨也往往是这一带水涝的一个形成原因。有时，在春夏之交，高山积雪融化，发源于高山的河流涨水也可能引起水灾。

（2）地形是形成水涝灾害的第二个主要因子。通常易受水涝之害的地形有：

① 迎风坡的山麓地区，例如华北平原西部和北部的太行山及燕山山脉，夏季东南风受到山坡的抬升作用，在迎风坡常常出现很猛烈的暴雨，一旦山洪爆发，山麓农田便遭受水灾。

② 河流中下游沿岸平原地区，雨季河流水位上涨，如遇暴雨，一时难以宣泄，则泛滥成灾。象黄河中下游河床高于两岸的地区，一旦河堤缺口，就会淹没大片农田与村镇，形成严重水灾。

③ 排水不畅，地下水位较高，地面滩洼纵横地区，遇雨则易形成涝害。一般江河汇集之处，河流与公路、铁路交叉之处，也都是水涝经常袭击的地区。

（二）湿害

1． 湿害的概念

湿害（渍害）指长江中下游地区春季或秋末多雨地区麦类等作物因土壤水过多而受害的一种农业气象灾害。

2． 湿害的成因及其危害

麦类作物湿害形成的原因主要有：

（1）气象原因。即麦类作物生育期间多雨，雨量大，雨日多。在麦类作物秋播期间，长江中下游的暖湿气流活跃，往往形成多雨天气。雨量和雨日都超过常年很多，如江苏常年11月上中旬总雨量是50—70毫米，雨日7—10天，最多年份雨量可达100毫米以上，雨日也在10天以上，使农田土壤板结，通气透水不良，造成苗期湿害。

在春季，麦类作物拔节以后，长江中下游地区若在暖湿空气活跃的年份，往往多阴雨天气。每次连阴雨过程持续时间也长，形成湿害，危害比较严重。苏州地区近20年来平均2—3年出现1—2次。

湿害对秋熟作物也有影响，据统计，江苏徐淮地区6—8月降水量在550毫米以上，则多数年份将比上一年减产15—20%，成为歉收年。

（2）三水的危害。这是指地表水，潜层水（犁底层上的积水）及地下水，在圩田和平原地区，河网水位往往较高，特别是一些低洼地区，春季多雨时，外河水位一般接近地面，这些情况对排除三水很不利。一些水利设施较差的农田，河网水位高，农田沟渠水系不配套，导致麦田地表水易积不易排，潜层水和地下水位易升不易降。特别当日雨量或过程雨量大于15毫米时，麦田地下水位明显上升，上升值可达20厘米甚至更多。加之潜层水的下渗作用，往往使潜层水与地下水相连，使麦类等作物根系长期处于过湿土壤之中，因而加重危害。

（3）土质的影响。农田土壤湿度变化的因素虽主要受雨量支配，但土壤物理性状也十分重要。如土质粘重，透水性差，滞水力强，则春季雨水越多，土壤湿度越大，直到土壤孔隙完全饱和，形成积水或径流。一次透雨后就可使田间毛管水饱和区侵入三麦根系密集层，与潜层水相结合。在5—7天内，耕作层土壤孔隙水往往仍保持在70%左右，连续下雨，造成湿害。

（4）农技措施的影响。若田间种植布局不当，水旱互包，

水旱交错的田块多，交错时间长，水田水不断渗入旱田，使旱田土壤湿度加大，地下水位抬高，造成人为湿害。

## 三、农田土壤水分的调节

### （一）汇集雨水、径流

水分的循环可以分为单循环、复循环两种。

1. 单循环

这是指大气降水不渗入或少渗入下层土壤，在土壤表面的耕作层直接而较快地从土壤蒸发和通过作物的蒸腾又回到大气中去的水分循环。这种循环，水分在土壤中停留时间短，循环路径也短，生态效应简单，受大气影响大，干湿变化剧烈，水分来去迅速，利用率不高，大部分从土壤表面直接蒸发返回到大气中去。这种单循环多是非生产性循环。

2. 复循环

这是指大气降水渗入土壤中，在深层再分布，变成深层贮水，然后通过植物吸收利用再蒸腾到大气中去的水分循环。这种循环，水分参与了植物有效的生产循环体系，所以又叫生产性循环。由于这种循环是在保水贮水性能良好的土壤中进行的，因此它具有较高的稳定性和生产能力。

有人提出，复循环水土系统具有巨大的潜力和待开发性。保护、开发和利用这个循环系统，是旱地农业生产高产稳产的重要保证。

缺水地区，汇集雨水径流，发展径流农业，即将大范围水集中到小面积上使用。据试验，1公顷地上10毫米雨水，集起来有100立方米的水，如果500公顷地上的雨水供50公顷的耕地用水，在干旱地区是很好的水分资源。

### （二）蓄水保土技术

对干旱地区和半干旱地区的农业发展来说，蓄水保土是十分重要的技术措施。全世界陆地约有三分之一的地区，处于干旱半干旱状态，即使非干旱、半干旱地区，也会遇有干旱季节，可见

蓄水保土的重要性。少耕免耕法、覆膜栽培技术、蓄水保水的理化方法等，对于保墒、提高水资源的利用效率，都有很好效果。

1． 少耕免耕法

这是在60—70年代才引起广泛重视的新耕作法。少耕法是指一次完成多种作业的耕作法，它包括耕、播同时进行的“耕播法”。还有“带状种植”，即将种子播在条带中，而各条带之间不进行耕翻的犁耕和播种一起完成的。

少耕免耕的优点：①减少土壤水分蒸发，增加降水入渗，提高水的利用率。②减少能源消耗和机械投资。据黑龙江省一个农场几年来实行耙茬耕种的调查，每亩耗油比传统翻耕法降低44—78%。据统计，到2000年，仅美国玉米、大豆实行免耕法来说，每年就可节省柴油15亿升。③增加土壤有机质和团粒结构，可以提高土壤肥力。大量残茬回田，在土壤微生物作用下形成腐殖质，和土壤颗粒胶结在一起而形成团粒结构。根据黑龙江红兴隆农场管理局科学研究所1978—1981年小麦—玉米—大豆轮作地所进行的多耕、少耕和免耕对比试验表明，土壤有机质含量，免耕是3.964%，少耕的1.765%，多耕的0.07%。

1965年在美国少耕免耕只占全国土地面积的1/54，而1977年已占1/7，1979年占1/4以上。英国、日本、苏联、荷兰、瑞典、加拿大在50—60年先后开展少耕、免耕的试验和推广。

2． 染色与覆盖

许多人试图给作物喷染色剂，增加反射率，减少辐射差额，从而减少水分消耗。如多雷斯瓦米（P.C.Doraiswamy）等（1974）对大豆喷高岭土，总反射率增加8%，辐射平衡减少8%；塞奇纳（I.Serginer）认为可减少辐射平衡15%，在平流不大时可减少蒸发耗热30%。但是喷了高岭土等，主要反射的是可见光部分，影响了光合作用效率。

使用覆盖物，不仅能直接防止地面蒸发造成的水分损失，有效利用土壤水分，而且能使土壤中的水、肥、气、热各因子互相协

调。覆盖栽培技术已成为当前农业最主要的措施。其效应为：①保水效应，膜内部与地面之间形成不透气小气室，切断了交换通道，有效地抑制了蒸发，透明塑料膜可以减少蒸发达90%；②增温效应，聚乙烯膜透光好，提高土壤及膜内气温，另一方面，大大减少了蒸发耗热；北方早春地温一般可提高2—4℃，所以盖膜栽培可以使作物早播，早出苗，出苗健壮从而达到早熟的目的；③光照效应，苗破膜生长后，膜的反射强，增加了下层叶片的受光量；④灭草效应，膜内生长的杂草因膜下温度太高而烫死；⑤保肥效应，避免了土壤水分大量蒸发和因降水而引起的板结、淋溶和肥料流失，膜内温度高，土壤微生物活动强，促进土壤中有效养分的转化。

（三）提高水分利用率

常用的措施有灌溉、种植方式（密植、行距、行向等）、屏障、作物与品种配置等，都对水分有效利用率有一定影响。

1. 灌溉

灌溉的时期与方式对水分有效利用率的影响很大。在水分临界期内灌溉，吸收效率最高，玉米如在吐丝到雌穗发育4—8天内缺水，减产40%，此时灌水增产效果最好，即水分有效利用率高。

灌溉方式的影响也很大。多斯（B.D.Doss）试验以玉米每天少量喷灌（2.5—7.5毫米）与定期地面灌水等方式进行对比、发现后者多耗水一倍，而玉米产量反而低，仅8.4吨/公顷；而前者产量9.2吨/公顷，明显地是前者水分有效利用率高。灌溉与水分有效利用率的关系，必须注意天气条件。

2. 种植方式（密植、行距与行向等）

据国外许多研究指出，土壤水充足时，高粱以窄行距比宽行距增产，而土壤水分有限时，窄行距利用水分较经济。因此土壤水分充足时适当密植与缩小行距有利，土壤缺水时反之。

至于行向，有人研究以107厘米行距东西行向玉米之水分丧失明显的比南北行向为高，水分利用效率最低。东西行与南北行

总产量无明显差异。每消耗2.54厘米水，东西行玉米1英亩只收获154公斤的产量，而南北行向收获169公斤产量，因东西行向吸收较多的净辐射，导致更多的水分丧失。因此，研究行向时不能只看辐射能之分布与收入，还必须重视水分利用率问题。

3. 风障

风障减少蒸散的原因是：减低风速、加大空气阻力，使水汽输送缓慢；且障内空气湿度加大。

罗森堡则认为充分灌水时障内外耗水无差异，干旱时风障下灌溉的豆子甚至加大了水分消耗。风障加大蒸散的原因是：减小气流阻力，增加温、湿度梯度；障内作物一般长得旺而叶面积大，增加了蒸腾面，且增加了粗糙度。正负两方面的作用往往相抵。只有在有明显平流显热时，风障减少湍流交换，从而明显减少障内的水分消耗。

总之。在一般情况下，风障不改变作物的水分有效利用率，在有大风与平流显热时，可明显提高水分的有效利用率，少耗水而增产。

4. 作物种类的选择

不论干湿条件，$C_3$植物比$C_4$植物之蒸腾率大。据7种$C_3$植物，19种$C_4$植物分别在2焦/厘米$^2$·分与4米/秒风速下比较，$C_3$植物在40%相对湿度下蒸腾率为5.17—3.09克水/分米$^2$·时，$C_4$植物为2.83—0.94克水/分米$^2$·时；在80%相对湿度下$C_3$植物蒸腾率为3.08—2.09克水/分米$^2$·时，而$C_4$植物只有2.21—0.64克水/分米$^2$·时。

高粱（$C_4$）的气孔阻力为大豆（$C_3$）的三倍，高粱有将近大豆两倍的根量，尽管高粱根多，由于蒸散量小，土壤中贮存的水仍比大豆为多。从拔节到抽穗，高粱净同化率为大豆同期的四倍左右。水分利用率高约为大豆的三倍，可见，针对不同气候特点，选用适宜的作物种类，是可以有效利用水分而获得高产的。

# 参 考 文 献

〔1〕木村和义等，植物对降雨反应的研究（史可琳等译），国外农学——农业气象，（3），（1984）。

〔2〕云南大学生物系，植物生态学，人民教育出版社，（1980）。

〔3〕北京农业大学农业气象专业编，农业气象学，科学出版社，（1982）。

〔4〕户苅义次〔日〕，作物的光合作用与物质生产（薛德榕译），科学出版社，（1979）。

〔5〕亓来福，关于土壤水分的测量技术，气象科技情报研究所编辑、出版，（1981）。

〔6〕D.Hill，土壤和水—物理原理和过程（华孟、叶和才译），农业出版社，（1981）。

〔7〕Pawl.J.Kramer, Water Relations of Plants, Academic Press, (1983).

〔8〕张福春、丘宝剑，县级农业气候分析和区划，气象出版社，（1984）。

〔9〕高亮之主编，作物气象生态译丛，农业出版社，（1984）。

〔10〕牛文元，农业自然条件分析，农业出版社，（1981）。

〔11〕山苍等，小麦灌浆期生理特性和土壤水分条件对灌浆影响的研究，植物生理学通讯，（3）（1980）。

〔12〕王沅等，小麦小花发育不同时期土壤干旱对成花与花粒的影响，作物学报，8（4），（1982）。

〔13〕张志杰，土壤水分状况对棉株体内可溶性糖的积累和运输的影响，植物生理学通讯，（3），（1980）。

〔14〕陈尚模等，土壤含水量影响喜温作物抗寒机理的研究，农业气象，4（1），（1983）。

〔15〕裴鑫德等，北京地区冬小麦需水量计算方法的研究初报，北京农业大学学报，9（4），（1983）。

〔16〕K.C.布伦格莱，旱地农业原理与实践，西北农学院干旱半干旱研究中心，（1985）。

〔17〕陶祖文等，华北平原地区春季降水渗透深度和"透雨"的农业气象估算方法，气象学报，41（4），（1983）。

〔18〕李合生，水势与植物，植物生理学通讯，（3），（1981）。

〔19〕王沙生，植物细胞水势的组成及其组合，植物生理学通讯，（1），（1985）。

# 第五章　空气、风与农业生产

## §1　碳、氮、氧的循环及对植物的影响

大气中含有多种元素和气体，归纳起来可分为惰性气体、生物循环气体和短寿（命）气体三类。按体积计算，大约有78%的氮、21%的氧和0.03%的二氧化碳，氩、氦、氢、甲烷、臭氧、氧化氢等约占0.94%，其中碳、氢、氧为植物细胞中各种有机物的组成成分。

### 一、碳素循环及平衡方程

在农业生物层中，二氧化碳既是植物进行光合作用、制造有机物质的原料，又对气候的形成具有特殊的作用。维持生命需要能量，在自然界生物系统中，这种能量来源于植物通过同化二氧化碳将太阳能转化为生物化学潜能，制造出的有机物质。近些年来，大气中的二氧化碳浓度迅速增长（图5.1），对于环境的影响越来越大，使它的农业意义也越来越突出。

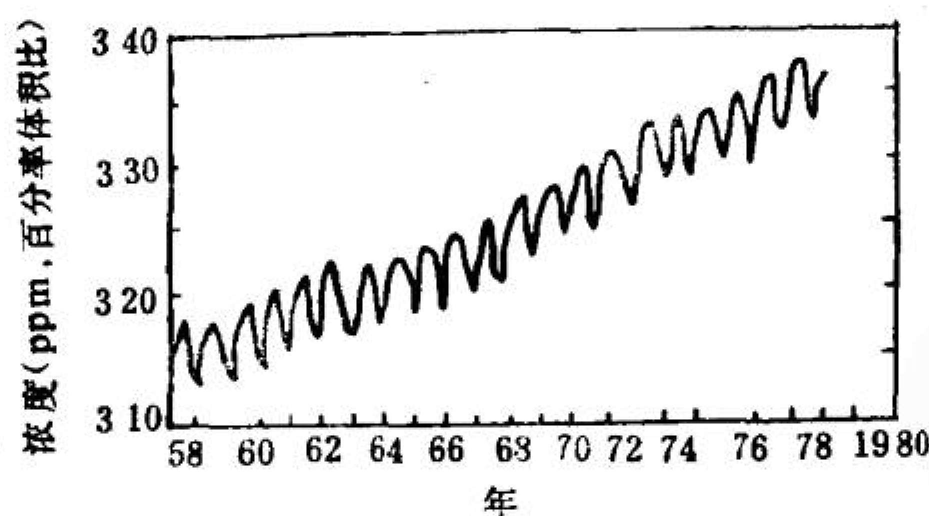



图5.1　斯克里普斯（Scripps）海洋研究所和NOAA在莫纳洛瓦观测站测得的$CO_2$浓度

（一）大气中二氧化碳的来源与去向

大气中二氧化碳主要来自以下途径：

（1）海洋

溶解在海洋中的二氧化碳是二氧化碳的一个巨大蓄库。据估计，海洋含碳量（$1.3\times10^{17}$公斤）比大气约高60倍。在自然情况下，海洋中二氧化碳含量是比较稳定的，从而使空气中二氧化碳含量也较稳定。

（2）人类活动

人类砍伐原始森林和燃烧化石燃料，每年向大气排放了大量的二氧化碳。同时，由于核武器的试验，也将一些放射性碳带进大气中。

（3）土壤

土壤通过植物根、土壤微生物和动物的呼吸以及化学氧化作用不断地向大气释放二氧化碳，并随温度升高而增大。土壤二氧化碳释放量可由蒙蒂斯经验公式计算：

$$P_s = P_s(0)3^{\frac{T}{10}} \qquad (5.1)$$

式中，$P_s(0)=0.9\times10^{-3}$千克/米$^2$·天，为土壤0℃时的二氧化碳释出量；T表示温度。

在湿润土壤中，微生物活动旺盛，使二氧化碳浓度升高，所以一般湿润土壤二氧化碳释放量较干燥土壤多。

大气中二氧化碳的主要去向有：

(1) 溶解进入水圈：$CO_2+H_2O\rightarrow H_2CO_3$；

(2) 淋化进入岩圈：$H_2CO_3+Ca^{++}\rightarrow CaCO_3\downarrow+2H^+$；

(3) 光合作用进入生物圈：$H_2O+CO_2\rightarrow\{CH_2O\}+O_2\uparrow$。

(二) 碳素循环

碳素循环总是部分地同能流混在一起，自然界中的碳源是大量的，也是多种多样的，但只有大气中气态二氧化碳，或溶解在水中的二氧化碳（各种碳酸氢盐）才能作为制造有机物的碳源。

碳素循环在陆地和海洋这两个既独立又相互联系的系统中进

行。陆地上的碳素循环主要包括光合作用和呼吸作用之间的细胞水平上的循环；大气二氧化碳与植物体间的个体水平上的循环；大气—植物—动物—微生物之间及食物链上的碳素循环以及生物地球化学循环等。

对整个地球而言，二氧化碳在高纬度冷水中的溶解度比在热带水体中高，因此，寒冷海洋大量吸收大气中的二氧化碳，并通过深层“寒流”再输送到热带地区，从而完成了全球水、陆二氧化碳的循环。

## 二、二氧化碳与植物

### （一）植物对二氧化碳的利用

生物界是由含有碳水化合物的复杂有机物质组成，都是直接或间接由绿色植物在光合作用中制造出来的。在高产作物中，生物产量的90—95%取自空气或呼吸作用所产生的二氧化碳，只有5—10%来自土壤矿物质或有机物分解的二氧化碳。据分析，在植物干重中碳占总干重的45%，氧占42%，氢占6.5%，氮占1.5%，其他成分占5%，而其中碳和氧主要都来自二氧化碳，因此二氧化碳对植物的生长有着极重要的意义。

对于大田群体作物，当周围空气的二氧化碳浓度不同时，会影响其气孔的开张度及二氧化碳进入其群体内的速度，从而直接影响植物的光合速率。在辐射能充分满足的条件下，作物的光合作用强度不再随二氧化碳浓度增加而增大时的二氧化碳浓度，称为二氧化碳饱和点，大多数作物二氧化碳饱和点在800—1800ppm左右。作物光合作用所消耗的二氧化碳与呼吸作用释放的二氧化碳达到平衡时，环境中的二氧化碳浓度，称为二氧化碳补偿点。作物处于二氧化碳补偿点时，表示光合强度等于零，作物没有干物质积累（图5.2）。二氧化碳补偿点低的作物，在较低的二氧化碳浓度中，仍有光合产物，在正常的二氧化碳浓度中，它的光合效率较高。所以，低二氧化碳补偿点往往可以作为作物高光合效率的一个指标。作物同化二氧化碳的速率是与很多因子有关的，

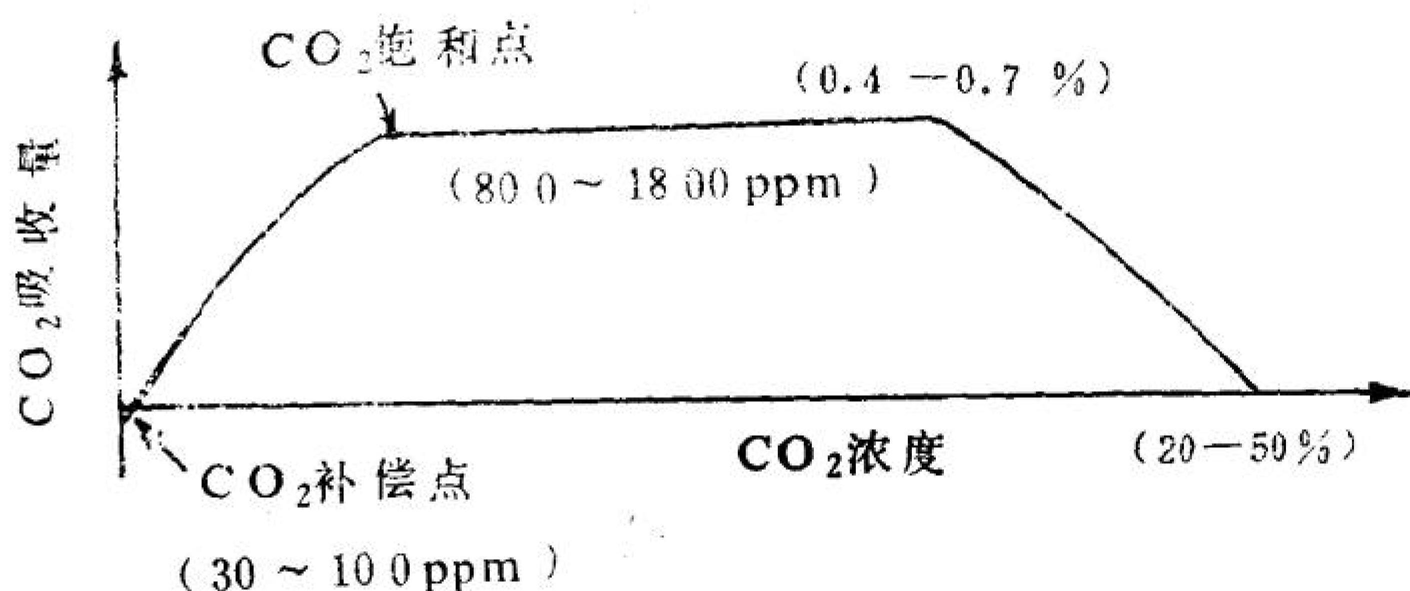



图5.2　叶子周围$CO_2$浓度与光合作用强度的关系（模式图）

主要是：

（1）种间差异　许多试验表明，$C_4$植物同化二氧化碳的速率比$C_3$植物要大得多。据测定，在同时适合$C_3$和$C_4$植物生长的环境中，在同样光强与二氧化碳浓度下，$C_4$植物可以比$C_3$植物的产量高出近一倍。

（2）光强的影响　光强与二氧化碳浓度及二氧化碳摄取量之间存在着非线性关系。其关系式为

$$P = D_{c(max)} \cdot C \cdot \frac{I}{a+I} \qquad (5.2)$$

式中，P为光合作用强度；$D_{c(max)}$为光达到饱和时及二氧化碳为某一浓度时的植物同化二氧化碳速率；I为光强；C为$CO_2$浓度；a为常数。由此式，若光强I很小，即使二氧化碳浓度较大，光合作用强度仍不可能大，反之，若二氧化碳浓度很小，即使光强较强，也不能使光合作用达到最大水平，这正是限制因子的观点。

（3）温度的影响　在光照强、二氧化碳固定反应系的能力控制着整个光合速度的阶段，温度的影响尤大。

由于地区气候及植物种类的不同，二氧化碳交换的最适、最

高和最低温度的界限不一，海洋性气候区和冷山区植物同化作用的界限温度偏低，而暖谷区植物偏高。

（4）水分的影响　正常的二氧化碳交换只有在水分供应适宜时进行，其范围比较狭窄。水分不足，气孔变狭，二氧化碳交换减少，同时原生质的水合作用减低，同化作用能力减弱。水分过多，二氧化碳交换能力逐渐减弱甚至停止。Wardaw (1967) 通过不同枯萎程度叶片光合能力的研究得出，随着叶片枯萎程度增强，不论在强光或弱光照射下，光合速度都减慢，即叶的水分含量减少，光化学反应系和二氧化碳固定反应系都减弱。

（5）风的影响　空气的流动，可不断地由群体外向作物层内输送和补充因光合作用消耗的二氧化碳。风还可以加强植物群体内的湍流，把土壤和下层叶片呼吸释放的二氧化碳带到光合能力较强的作物群体上层，这就提高了群体下部及由土壤释放出来的二氧化碳的有效性。据计算，要满足作物对二氧化碳的需要量，必须保证农田上方风速为1.5—2.0米/秒。若仅仅依靠扩散作用来补充农田中的二氧化碳，则从农田外的大气进入作物层的二氧化碳，仅为作物需要量的12%，远远满足不了作物对二氧化碳的需求。在晴朗无风的条件下，农田中二氧化碳往往感到匮缺。通风较好的农田，二氧化碳铅直和水平交换的结果，农田中的二氧化碳浓度全天都在大气平均浓度的水平上，日变化较小。随着风速增大，二氧化碳的扩散阻力明显减小，这也是风能够促进二氧化碳同化量的主要原因之一。

通风透光对作物的生长发育起着很大作用，而要使群体内的通风情况良好，显然要有合理的群体结构。从内岛、蒙蒂斯等的研究结果（图5.3）看出，在直立叶较多的玉米群体中，二氧化碳最低浓度层随太阳高度升高而向群体深层移动。而在水平叶较多的莱豆群体中，就没有这种变化。但它的二氧化碳浓度梯度比直立叶群体中大。这主要是由于水平叶莱豆群体内透光不良及二氧化碳扩散阻力大的缘故。

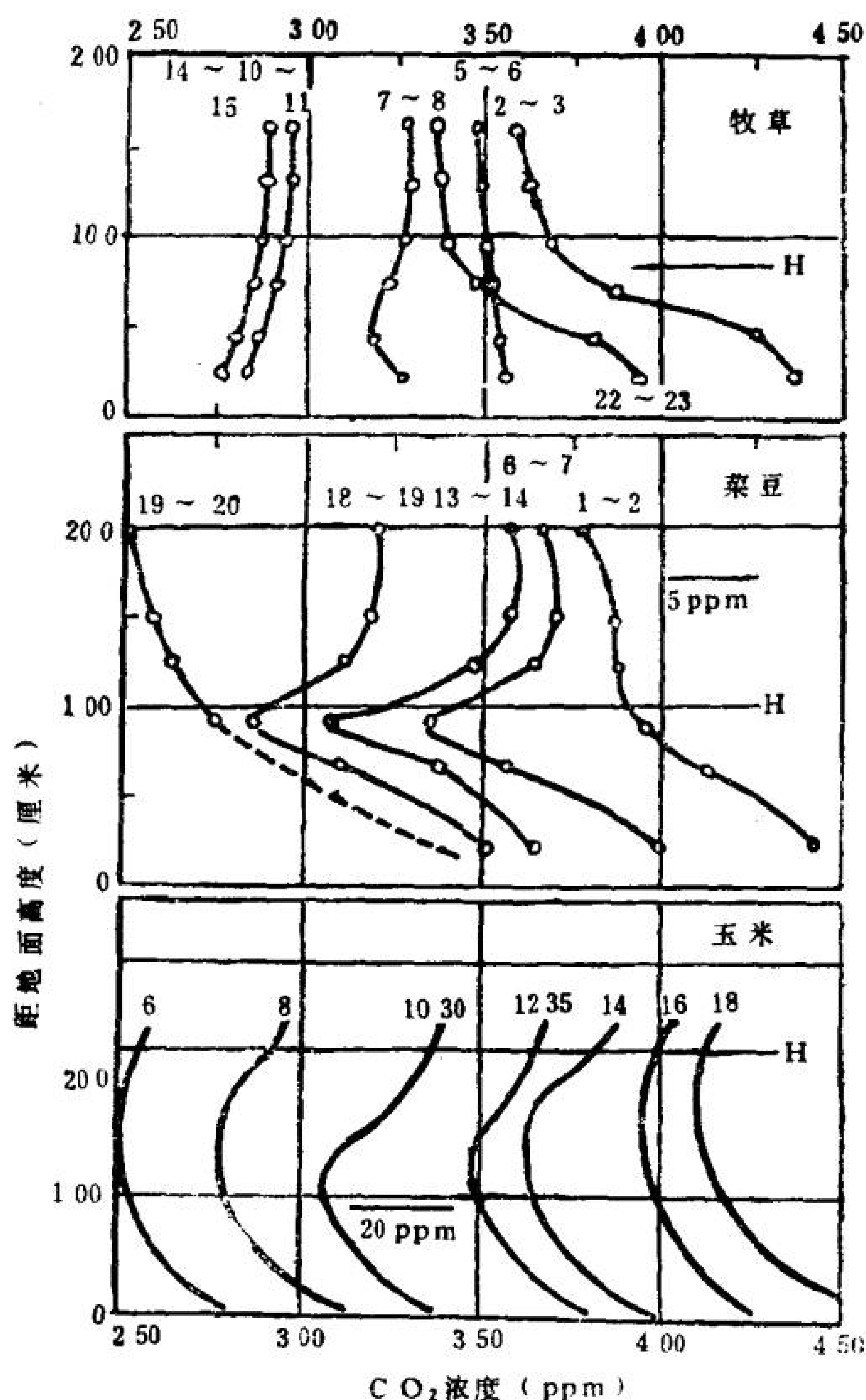



图5.3 作物群体内层$CO_2$浓度变化状况 牧草、蚕豆（Monteith, 1962），玉米（内岛等，1967）

必须指出，外界因子对二氧化碳的影响不是孤立的。植物气体交换速率是许多内部和外部因子相互作用的表现，单个因子只能在一定时间内起限制作用。二氧化碳由大气进入植物体内要经过几个不同的途径并遇到不同的阻力，人们常用下式计算植物的光合作用：

$$P = f \cdot \frac{[CO_2]_{空气} - [CO_2]_{叶绿体}}{r_a + r_s + r_m} \qquad (5.3)$$

式中，f 为二氧化碳单位换算系数；$r_a$ 表示二氧化碳自叶子周围扩散至叶片外表皮的空气阻力。在这一段中，叶片界面层以外空气状况多为湍流，界面层内部则为片流。因此在界面层外部扩散阻力主要由风及湍流状况所决定，而界面层厚度则由风速、叶片腊质层、茸毛层厚度等决定。显然，在界面层内部的扩散阻力是很大的。$r_s$ 为二氧化碳自叶片外表皮通过气相扩散经气孔到达内表皮的气孔阻力。这一段的阻力主要由气孔开张度所决定。$r_m$ 为二氧化碳自叶子内表皮扩散至叶绿体的叶肉阻力。这部分阻力主要取决于叶肉细胞间隙的比例（叶肉细胞间隙的容积占叶子总容积的比例）、叶片含水量、叶肉细胞密度及细胞平均半径等。

（二）二氧化碳增加对植物的影响

1. 直接影响

在一定范围内提高二氧化碳浓度，对增加植物的生长量是很重要的。近年来二氧化碳施肥已由试验转为实际应用阶段。在北欧诸国如荷兰，温室内番茄有80%以上，莴苣有70%以上采用二氧化碳施肥栽培。但一般农民还不能达到广泛应用的程度。提高二氧化碳浓度对植物产生的影响主要是：

（1）提高植物光饱和点，比如大豆在二氧化碳浓度为 300 ppm时，光饱和点为21000勒克斯；在1600ppm时，光强在75000勒克斯尚未达到饱和。其他作物也有类似情况。

（2）增加生长量和产量，提高二氧化碳浓度对绝大多数作物都有增加生长量和产量的效果。不同作物反应不同表(5.1)。$CO_2$施肥对于根菜类或重视根部重量增长的各种植物的幼苗，增产效果明显。对于果菜类或以种子为收获对象的植物，对其花数及果实产量的影响也很明显。在花卉栽培上也可看到 $CO_2$ 施肥使花数增多、开花期以及果实收获期均提前的实例。近年来，菲律宾国际水稻研究所发现，在塑料薄膜温室内，当太阳辐射能处于一般

表5.1 大气中$CO_2$浓度对作物干重产量的影响

| 作物名称 | | 干物重（克/株） | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 300ppm$CO_2$区（对照） | 1000ppm $CO_2$区 | 为对照的% | 2500ppm $CO_2$区 | 为对照的% |
| 三碳植物 | 水稻 | 1.173 | 2.462 | 210 | 3.067 | 262 |
| | 花生 | 2.138 | 4.020 | 188 | 4.797 | 224 |
| | 向日葵 | 1.344 | 2.892 | 215 | 2.961 | 220 |
| | 大豆 | 1.209 | 3.270 | 250 | 2.643 | 219 |
| 四碳植物 | 杂交高粱 | 4.917 | 5.283 | 107 | 5.640 | 115 |
| | 玉米 | 3.098 | 3.153 | 102 | 2.918 | 94 |
| | 藜 | 1.992 | 2.356 | 108 | 2.683 | 135 |

（施定基、闵瑾如，1978）

状况时，水稻抽穗前增加$CO_2$浓度，籽粒数及千粒重均明显提高，抽穗后进行同样浓度的处理，效果稍差。总之，增加$CO_2$浓度后，各种植物都能在不同程度上提高产量及生长量。

（3）对叶片的影响，经$CO_2$施肥能够形成较厚、内含物较充实且叶面积较大的叶片，叶片上气孔的体积以及单位叶面积的气孔数也随之增多，单位叶面积的干物质增长率也有提高。

此外，经二氧化碳施肥，对植物体内成分，如氮、磷、钾及叶绿素、粗脂肪、碳水化合物含量等都有不同程度影响。尤其是果实中的糖、柠檬酸及以果胶含量为指标的比粘度等含量均有提高，果味更加浓郁。

二氧化碳施肥的效果是受其他环境因子影响的。一般情况下，二氧化碳浓度对光合强度的效应是光越强，温度越高，越显著。如今津等曾以同一浓度的二氧化碳进行施肥，发现冬季效果远比夏季差。并认为，对于一定的干物质生产量W来说，二氧化碳浓度与日射量之间存在下列关系：

$$A\log C(\Sigma I_2 - \Sigma I_1) = W = \text{恒定} \qquad (5.4)$$

式中，C为$CO_2$浓度，$\Sigma I_1$、$\Sigma I_2$分别表示两个时期的累积日射量，A为常数。（5.4）式表明，$CO_2$浓度与日射量效应之间存在着相互补偿作用。在普通空气中几乎观测不到光合强度受叶温控制的情况，但在$CO_2$高浓度下却常常被叶温所控制。另外，日平均温度相同，$CO_2$施肥效果在日较差较大时远高于恒温条件下。

二氧化碳施肥应当注意以下几个问题：

（1）适施的范围及浓度，由于二氧化碳属于气体物质，容易逸散，在大田中增加二氧化碳浓度有相当的困难，因此二氧化碳施肥的适宜场所，目前还只局限于玻璃或塑料温室及坑道温室等封闭系统环境。对于蔬菜、花卉等室内栽培的园艺作物，也可进行适当的二氧化碳施肥。内岛根据二氧化碳平衡公式导出二氧化碳施用量（I）的公式如下：

$$I = \frac{Q}{A_f}\left[C_{内} + \frac{D_c}{k}\ln P_*\right] - R_P - \frac{Q}{A_f}C_{外} \qquad (5.5)$$

式中：Q为通风量（$=V \cdot N/3600$），V为温室容积，N为通风次数；$A_f$为地面面积；$C_{内}$、$C_{外}$分别为温室内外的二氧化碳浓度；$D_c$为叶内与周围空气间的二氧化碳扩散速度；k为辐射的衰减系数；$P_*$为群体光合作用的函数；$R_P$为群体呼吸量。从实际栽培看，施以0.15—0.3%范围的二氧化碳浓度，对绝大多数作物都是较适当的。但考虑到其经济成本及现实的人工设施结构等，一般只要维持比普通空气二氧化碳浓度高出2—3倍，即达到0.06—0.1%左右的水平，就可以得到一定的施肥效果。二氧化碳浓度超过正常浓度的10—20倍，光合作用强度很少再增加，有时反而会引起气孔关闭，光合强度降低。

（2）适施的方法及时间，在二氧化碳施肥已达到实际应用阶段的今天，亟待解决的问题是如何获得二氧化碳及选定适施时期。

关于二氧化碳的获得，迄今已进行过各种试验，包括通过化学反应获得二氧化碳及导入酿造工厂空气或废气的方法。有人还提出通过增高土壤的呼吸以增加二氧化碳的数量。美国密执安大学的韦特沃等人曾设想由喷洒于作物上的微粒胶囊中缓慢地向外释放二氧化碳的方法或在田间灌溉系统的水中加入二氧化碳的方法。他们还认真地探讨通过深部钻井以取得蕴藏于地球内部的二氧化碳的设想。在农村以大量堆肥和厩肥混入土壤中，能促进土壤好气细菌活动，呼吸作用加强，使土壤释放出更多的二氧化碳，达到二氧化碳施肥的效果。目前在暖房内实际施用二氧化碳的方法各种各样，也各有优缺点。

二氧化碳适施时间，以生殖生长期内施二氧化碳气肥效果最好。例如水稻从开花到灌浆初期，棉花在开花后一周内，如果二氧化碳供应不足，光合作用会明显降低，引起大量空秕粒或棉花幼铃脱落。这时增施二氧化碳就能提高光合作用强度，减少空秕粒

或达到保铃的效果。在植物光合作用最旺时期，叶面积系数增高，营养生长最旺盛或恰值营养、生殖生长两旺时期，需二氧化碳量也最多，应增施二氧化碳以补不足。从外界条件来讲，在光照较强，温度较高，水分供应充足的情况下，光合作用强度主要受空气中二氧化碳浓度高低的制约，这时增施二氧化碳，效果特别好。在一天中，为了防止温度过高，除了隆冬时期外，必须在中午打开换气窗。所以适宜进行二氧化碳施肥时间，只局限于日出后至换气前数小时。但这段时间一般光照不很强，气温也不很高，可能影响施肥效果。尽管如此，利用这段时间施肥，仍可获得一定效果。若这时能用电灯补充光照以提高光强，施肥效果就会进一步提高。在育苗期施肥，培育壮苗，对移植后生育和产量也可带来良好效果。

2． 间接影响

（1）对热量状况的影响　大气中二氧化碳对太阳短波辐射几乎不吸收，而吸收地面长波辐射，同时也向地面放出长波辐射，特别是在波长1200—1800nm之间的红外区域，它集中了大部分从地球表面向空间发射的热辐射。二氧化碳这种强烈的吸收，大大地降低从地面向外层空间失去的热辐射量。空气中的二氧化碳含量越高，这种作用越明显，对地面的增温效应也就越显著。这就是“温室效应”。这时，气温也将随之上升，并使无霜期和作物生长季延长、农作物种植界限和耕作制度发生变化。中纬度地区，温度往往是影响作物生育、产量和品质的关键因子，增温效应可减弱低温的胁迫作用，使产量和质量提高。但随之而来的害处是可能使害虫数量大幅度增加，危害期延长。同时高温有可能加速农药和肥料的分解，降低杀虫剂和除草剂的效率。

（2）对水分状况的影响　气候变暖的一个直接后果是冰雪消融，海平面上升，海陆面积发生变化，这对水分循环产生一定影响。北冰洋由于温度升高，水面蒸发增加，高低纬间温差减小，经向环流和海洋向大陆的水汽输送强度减弱，使沿海地区的降水

将有明显增加，而大陆中心降水减少。这样一种温度高，蒸发大而降水少的后果对于欧亚大陆中心广大地区的农业生产力，将会带来威胁。尤其是高纬度地区，会促使农田更为干燥，容易引起土壤沙漠化。

另一方面，二氧化碳浓度增高会使植物的水分利用率随之提高（图5.4）。据查德哈里对高粱的试验表明，当二氧化碳浓度由330ppm 增至 795ppm 时，叶片、茎、根、籽粒的单位干物质水

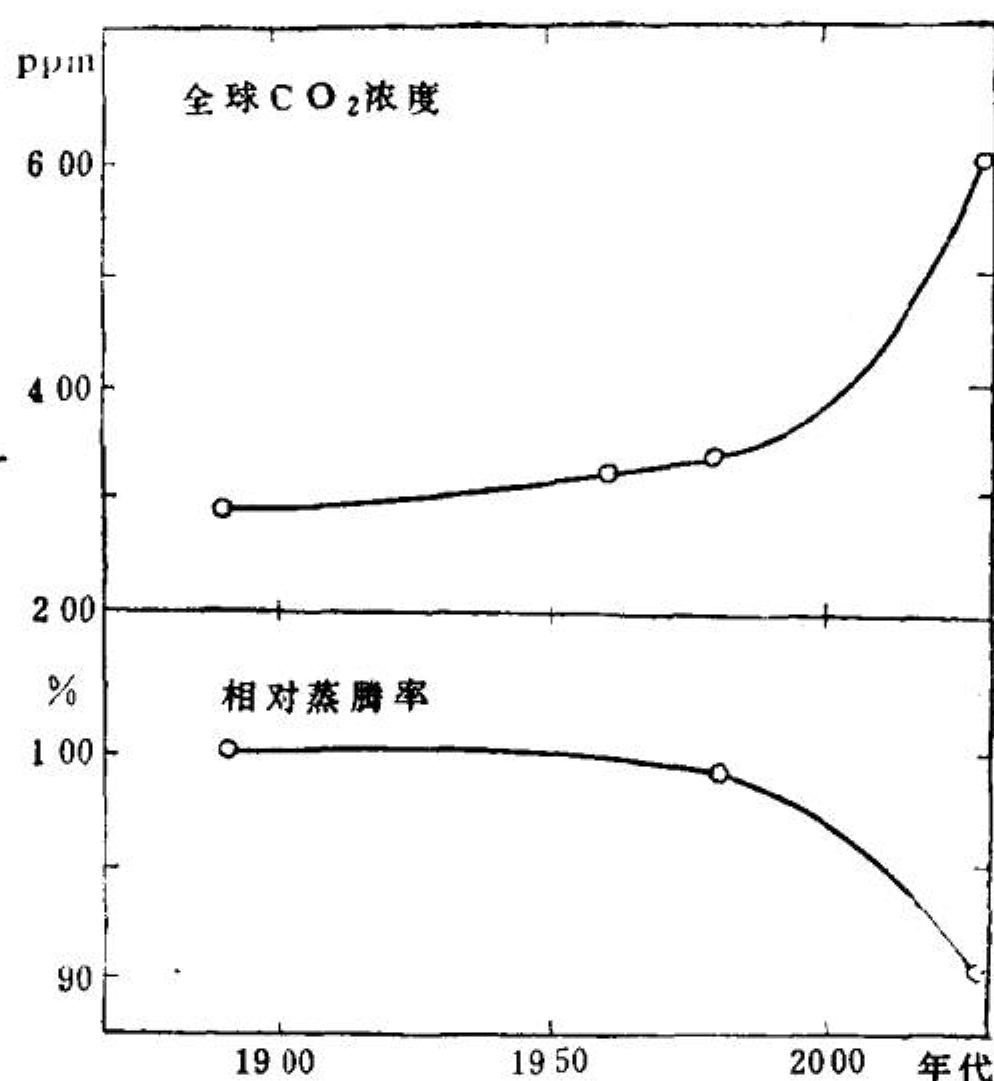



图5.4 从1890—2030年全球$CO_2$浓度的估算值和计算的相对蒸腾率（1890年的相对蒸腾率取为100%）（引自H.Z.Enoch等）

分使用量分别减少13%、30%、31%和29%。据估算地球上高等植物的蒸腾量约占全球陆地表面总蒸发量的 3/4，占整个地球总蒸发量的 1/8，二氧化碳浓度上升对植物蒸腾的抑制作用有可能对全球的水分平衡和气候产生重要影响。同时，由于这种效应，

减少植物的水分需求量，有可能普遍提高作物的抗旱能力，这对干旱、半干旱条件下的农业生产将产生积极作用。

总之，大气中二氧化碳浓度的增加引起气候环境的改变将对农业生产带来不可忽视的作用。这种影响在规模上往往是全球性的，在时间上是久远的，这就要求人们能够逐渐从理论上，分析判明其影响的机制及后果，并拟定出阻止其向不利方向演化的具体措施。

## 三、二氧化碳通量、浓度的时空变化规律

### （一）二氧化碳通量的变化

植物需要不断地从外界得到二氧化碳以满足它生长发育的需要。因此，可从湍流扩散的角度来得到农田上方（即大气中）二氧化碳的铅直输送公式：

$$q_c = f_c k_c \frac{\partial c}{\partial z} \tag{5.6}$$

式中，$q_c$为铅直方向的二氧化碳通量；$f_c$为单位换算系数；$k_c$为二氧化碳的湍流交换系数；$\frac{\partial c}{\partial z}$为二氧化碳浓度的铅直梯度。井上等应用桑斯威特-霍尔兹曼公式计算后，将上式变为：

$$q_c = f_c \frac{\text{æ}^2(1-\sigma Ri)(u_2-u_1)(c_2-c_1)}{\left(\ln\frac{z_2-d}{z_1-d}\right)^2} \tag{5.7}$$

式中：$u_1$、$u_2$分别为$z_2$、$z_1$高度上的平均风速；æ是卡曼常数，一般取0.4左右；$c_1$、$c_2$分别为$z_1$，$z_2$高度上的二氧化碳浓度；d 为零平面位移；$\sigma$为常数；Ri 为里查逊数，它表明了流体沿铅直方向运动时抵抗重力的作功率（消耗率）与由湍流能量的供给率的比值，亦即表明热力因素与动力因素的对比关系，说明稳定度条件对于交换的影响。根据里查逊数可以了解大气中湍流发展的程度。如当 $Ri>0$，则此时大气层结稳定，热力作用阻碍湍流运动的发展，不利于二氧化碳的扩散，通常在夜间出现。当 $Ri<0$，则层结不稳定，湍流随着不稳定度的增加而加强，“湍涡”从热

力不稳定中获得补充能量，湍流大为加强，这与日间强烈的超绝热情况相符合。这种情况对二氧化碳的扩散是有利的，常出现在白天，尤以正午前后为突出。一般来讲，白天二氧化碳的扩散运动比晚上强得多。当 $Ri=0$，大气层结是中性的，湍流运动如在均匀流体中一样，这种情况大致可在一天的早晚时刻出现。若只考虑中性层结，则（5.7）式变为：

$$q_c = f_c \frac{æ^2(u_2-u_1)(c_2-c_1)}{\left(\ln\frac{z_2-d}{z_1-d}\right)^2} \tag{5.8}$$

在（5.7）式中令：$z_1=z_0+d$，$z_2=z$[1]，则（5.7）式变为

$$q_c = f_c \frac{æ^2(1-\sigma Ri)(c_z-c_0)u_z}{\left(\ln\frac{z-d}{z_0}\right)^2} \tag{5.9}$$

由此式看出二氧化碳浓度差、风速及大气层结稳定度是影响植被上方二氧化碳通量的主要因子。

农田群体中二氧化碳通量随高度和时间的变化，比群体上方复杂。可用函数式来表示任一高度 z 的二氧化碳扩散情况，即：

$$\frac{\partial}{\partial z}\left(f_c k_c \frac{\partial c}{\partial z}\right) = f_L(z)p(z) - f_L(z)r_p \tag{5.10}$$

式中，$f_L(z)$为叶面积密度；$p(z)$为单位叶面积的二氧化碳吸收（光合）强度；$r_p$ 为单位叶面积的二氧化碳排出（呼吸）强度。有了扩散系数、叶面积密度、光合和呼吸强度在群体内的变化，可对（5.10）式进行积分，即可求出群体内二氧化碳分布和二氧化碳通量高度的变化。关于光合强度（p）、呼吸强度($r_p$)、扩散系数$k_c$、光的透射等可用下式求算：

---

1） 这里的$z_0$实为粗糙度，d为零平面位移，所以在 $z_0+d$高度的风速$u_1$应为 0。

$$P = D_{c(max)} \cdot C \cdot \frac{I}{a+I},$$

$$r_p = \text{const} = \alpha p_\infty;$$

$$k_c(z) = k_c(H) - \sigma(H - Z);$$

$$I = \frac{k_c(H)}{1-\tau} I_H \exp\left(-k\int_z^H f_L(z)dz\right)。$$

式中；$P_\infty = D_{c(max)} \cdot C_a$为光饱和条件下的光合强度；H为群体高度；$\alpha$、$\sigma$为常数；k为衰减系数；$I_H$、$k_c(H)$分别为H高度处的光照强度和扩散系数；其余符号相同。

将二氧化碳浓度和通量仅仅看成是高度的函数，且忽略等式右边第二项，则（5.10）式可变为：

$$\frac{d}{dz}\left(f_c k_c \frac{dc}{dz}\right) = f_L(z)p(z)$$

即
$$d\left(f_c k_c(z)\frac{dc}{dz}\right) = f_L(z)p(z)dz$$

积分可得

$$f_c\left[k_c(H)\frac{dc}{dz} - k_c(z)\frac{dc}{dz}\right] = \int_z^H f_L(z)p(z)dz$$

即
$$q_c(z) = q_c(H) - \int_z^H f_L(z)p(z)dz \qquad (5.11)$$

此即作物群体内二氧化碳通量的表达式，式中$q_c(H)$为作物群体表面的二氧化碳通量。

从（5.10）式可清楚看到群体内任一高度上的二氧化碳通量等于群体表面的二氧化碳通量减去群体表面到该高度上的叶片净吸收的二氧化碳量。这时可分两种情况：

（1）白天，$p(z)>0$，$q_c(z)<q_c(H)$，二氧化碳通量向下。

（2）夜晚，$p(z)<0$，$q_c(z)>q_c(H)$，二氧化碳通量向上。

由通量公式（5.6）取偏导，可得到通量随高度的变化速率：

$$\frac{\partial q_c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z}\left(f_c k_c \frac{\partial c}{\partial z}\right) = \left(\frac{\partial k_c}{\partial z} \cdot \frac{\partial c}{\partial z} + k_c \frac{\partial^2 c}{\partial z^2}\right) f_c \tag{5.12}$$

二氧化碳通量随高度变化，主要是植物光合作用同化二氧化碳或呼吸作用释放二氧化碳所引起的。所以$\frac{\partial q_c}{\partial z}$也就相当于某一层叶片的净光合作用强度，由此：

（1）当$\frac{\partial q_c}{\partial z} > 0$，表示植物同化二氧化碳多而呼吸释放少，这种净吸收量为正的区域称为二氧化碳的汇。

（2）当$\frac{\partial q_c}{\partial z} < 0$，表明这时植物同化的二氧化碳少而呼吸放出的多，这种净吸收量为负的区域，称为二氧化碳的源。

（3）当$\frac{\partial q_c}{\partial z} = 0$，表明净光合作用强度为零，植物的光合积累与呼吸消耗相等，净吸收量为零，则该区域处二氧化碳补偿点。

一般说来，二氧化碳源和汇的强度决定于光合作用总面积和光合的效率。若其他因素一样，则作物覆盖面积越大，叶和茎生长越旺盛、固定二氧化碳的能力和呼吸放出二氧化碳的量也越大，二氧化碳浓度变化的日振幅也越大，即源和汇的强度越大。在白天，植物群体是二氧化碳的汇而大气是二氧化碳的源。这时二氧化碳由大气向作物群体中输送，这种二氧化碳浓度随高度而增大的分布型称之为光合型。夜晚因植物呼吸释放二氧化碳，群体变成了二氧化碳的源而大气是二氧化碳的汇，这时二氧化碳由群体输送到大气中。这种二氧化碳浓度随高度而减小的分布型称之为呼吸型。但无论日夜，土壤总是源，不断地向植物和大气输送二氧化碳。

（二）二氧化碳浓度的变化

由公式（5.9）、（5,11）经整理，进一步得到群体上方和群体内任意高度的二氧化碳浓度的表达式：

群体上方：$$C_Z = C_0 + \frac{q_c}{f_c æ^2 u_z}\left(\ln\frac{z-d}{z_0}\right)^2 \qquad (5.13)$$

群体内：$$C(Z) = C(H) - \int_Z^H \left(\frac{q_c(H) - \int_Z^H f_L(z)p(z)dz}{K_c(z)}\right) dz$$

（5.14）

式中，C(H)是作物表层的二氧化碳浓度。

由此可见，大气与农田群体中的二氧化碳浓度不仅与通量、风速和大气层结稳定度有关，而且还受许多生物和环境因子的制约，因此，二氧化碳浓度是不断变化的。

1．时间变化

因为生物因子和环境中的气象因子具有日、年变化，所以空气中的二氧化碳浓度也有着以日、年为周期的变化。

在晴朗无风的日子里，大气中二氧化碳浓度有着明显的日变化。白天，随着光照强度的增大，作物的光合作用也逐渐增大，农田群体中二氧化碳浓度逐渐降低，并在午后达到最低，可低到220ppm左右，甚至更低。从图5.5上看出，日出后两小时内，随着光合作用的加强，几个高度上的二氧化碳浓度都急剧下降，以后，直到日落前几小时内，各个高度的二氧化碳仅有微小的变化，各层之间浓度差异也不大。日落之后，光合作用逐渐停止，呼吸仍在继续，加之土壤本身的呼吸作用和微生物的分解所放出的二氧化碳，使得接近地面的空气层内二氧化碳浓度高达400ppm以上。夜晚距地面越高，二氧化碳浓度越小，呈呼吸型。一般在清晨由呼吸型转向光合型是非常急剧和突然的。傍晚由光合型向呼吸型转变，则不突然。

全年各月$CO_2$浓度均为昼低夜高，夏季尤为突出。这与农业

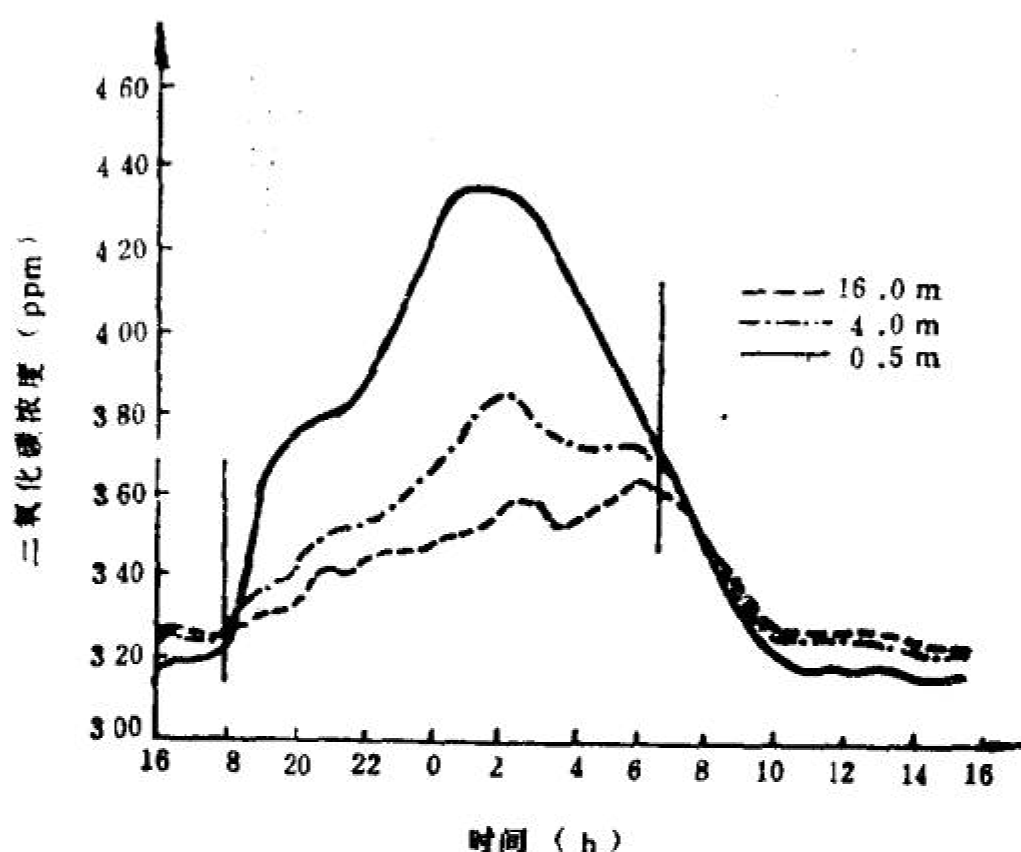



图5.5　不同高度二氧化碳浓度的日变化

生物在一年内的兴衰密切相关。在30°N以北地区的大气中，从4月至9月，$CO_2$浓度减少3％。且土壤中有机质也在不断分解。大气中$CO_2$浓度一般在夏末达到最低值，9月到次年4月是一个积累时期，浓度逐渐上升，到冬末春初达到最大值。

各地二氧化碳浓度的最大值和最小值出现的月份因年际而略有出入，年较差大小各地也不一样。除热带外，二氧化碳浓度的年变化陆地大于海洋。

2． 空间变化

二氧化碳浓度的空间变化，主要指其垂直变化。二氧化碳浓度随高度的分布受近地气层二氧化碳被固定和释放的情况所控制。当地面覆有植被，光合作用旺盛时，二氧化碳被大量固定，二氧化碳浓度随高度下降而明显降低，呈光合型。这期间，从地面到16千米高度，二氧化碳浓度均低于320ppm。在光合作用微弱甚至停止时，只有土壤及动物呼吸和燃烧等释放二氧化碳的过程，则越近地面，浓度越高，呈呼吸型。从地面到16千米高处，二氧化碳浓度均高于320ppm。大气中二氧化碳浓度的年变化，一般波动到16千米高处。日变化曲线(图5.5)越接近地面，波动越大。由

图5.5还可看出随着高度增高，最高值明显滞后。这表明二氧化碳浓度的变化是受到近地气层湍流扩散影响的。

群体内二氧化碳浓度的垂直分布因群体种类、状态以及气象条件而有很大变化。植被和大气在日夜间作为二氧化碳的汇和源，并进行交替作用，形成农田中二氧化碳浓度垂直分布的特殊性。从玉米地的二氧化碳浓度廓线图（图5.6），可以看出这种特殊性。

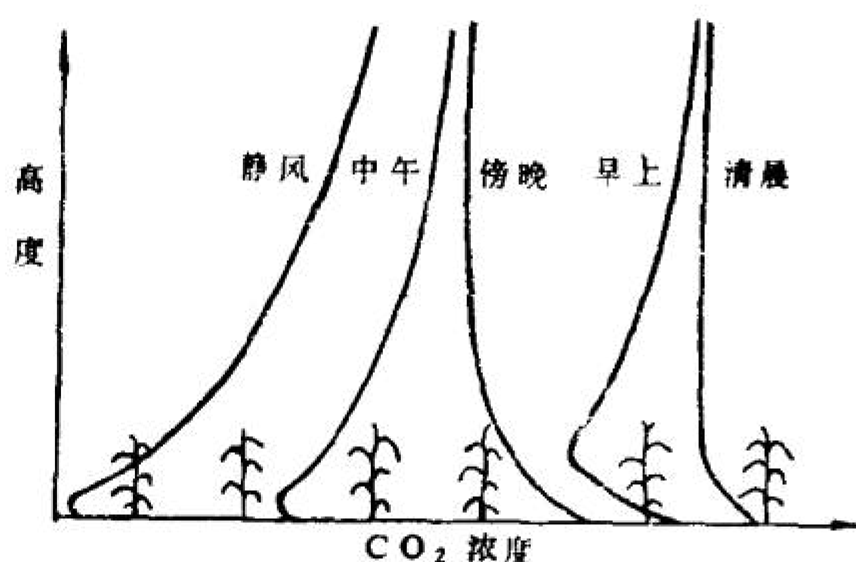



图5.6　晴天农田上各时刻$CO_2$浓度的铅直分布示意图

（据雷蒙，1960年）

影响二氧化碳浓度时空分布规律的因子很多，所有影响植物进行二氧化碳交换的因子，都会影响它的分布，尤其是风速、云量等对二氧化碳浓度的时空分布有着极大的影响。

**四、氮素循环及对生物的影响**

氮循环是所有生命必需的元素循环中最复杂的循环，不仅是因为氮在自然界中有各种形态，也因为在循环的不同阶段都有微生物参加。

大气圈是氮的最大贮蓄库，是保证生态系统获取氮素的源泉，但气态氮不能被绝大多数植物直接利用，大气只能以各种方式间接供应循环中所需的氮。

在氮素循环中，微生物是不可少的角色。固氮、氨化、硝化、反硝化等作用都是在微生物参与下进行的。微生物的固氮作用，

可使大量的氮进入生态系统。

在生物固氮方面，豆科作物的共生固氮约占全球生物固氮总量的40%左右。这些根瘤菌能同化大量的分子氮，并转变为植物吸收的氮。一些固氮物的固氮能力见表5.2。

**表5.2　地球上的固氮量**

| 固氮类型 | 固氮量（公斤/公顷·年） | 固氮类型 | 固氮量（公斤/公顷·年） | 固氮类型 | 固氮量（公斤/公顷·年） |
|---|---|---|---|---|---|
| 豆科作物 | 100 | 牧场、草原 | 13 | 闪电 | 10 |
| 非豆科作物 | 35 | 山林和森林地 | 8 | 燃烧 | 20 |
| 稻　田 | 30 | 未开垦地 | 2 | 化肥生产 | 40 |
| 一般旱地 | 3 | 海洋 | 0.75 | 其他 | 10 |

一些与根瘤菌不同的细菌也能与非豆科的其他高等植物共生并直接从空气中固氮。此外，雷雨放电、光氧化作用、腐蚀作用、悬浮微粒的形成、火山活动，特别是工业烟尘和气体放电等常使空气中的氮和氧发生作用而形成氮氧化物。降水可将这些氮氧化物带入土壤中。在水域或潮湿地区，某些蓝藻也能直接从空气中固氮。

只要人类不进行干预，生态系统中的氮循环速度总是由微生物的分解活性来调节的。对于不受外界干扰的多数生态系统，氮在循环时的损失都不大。由水和空气带走的氮量很少，常有大量的有机氮积累于植物及微生物中。自养植物从土壤中取走的$NO_3^-$或$NH_4^+$态氮先被结合于植物体中，以后再回到土壤。在这里含氮有机物积累起来，直到它们被形成氨的氨化细菌及其他分解者再度矿质化为止。在矿质化前大部分氮被保存起来避免了淋失。而高等植物从周围环境中摄取了无机氮化合物后，只是在例外情况下才将很少量的同化产物分解到无机水平（$NH_3$）。氮主要以有机结合形态被排除出去，比较大量的氮是以落叶和落果的方式而丢失。当受火灾、地震、灌溉、有机物燃烧或其他人为干扰时，生

物氮迅速转变为其他形式的氮化物逸失或被雨水淋洗而流失。但$NH_4^+$不致被淋溶冲失，它将被腐殖质中的一些胶体物质所吸收。

虽然有反硝化作用存在，但陆地上固定氮的数量仍在不断增加，如豆科作物固定的氮至少将增加10%，以肥料形式由工业固定的氮每6年将增加1倍。且现在只有1/3的施肥量甚至更少能被农作物吸收，剩下的2/3被淋溶进入海洋。由生物活动形成的大部分氮，也以同样比例的数量进入河流、湖泊或海域。水域中过饱和的氮不能得到反硝化作用的抵消。所以在土壤和生态系统的生物循环过程中，氮的数量都可能增加，并通过输入方式而使地下水的含氮量上升，引起富营养化现象的出现和氮污染。其结果是对利用地下水的人类造成危害。氮化物还有致癌性和对臭氧层具有破坏作用的特性。

**五、氧循环及对生物的影响**

氧是大气中仅次于氮的极丰富的元素。在空气和水中可利用的氧主要是由大气圈上层水的光解作用及一些自养生物形成的。地球上富氧环境的存在，对高度组织化的生命形态的发展是一个先决条件。这些生命形态由于有氧呼吸的能量供应，已经体现在生理学性能上的多样性。

氧的循环也是比较复杂的，因为大量无机化合物，如硅酸盐、水、碳酸盐等都含有氧。而且在大气流动的作用下空气中的氧可渗透到生态系统的每个角落。

生物圈在大气圈和水圈的氧循环中起着重要作用。它既可通过物理的蒸腾过程，也可借助水的光氧化作用产生分子氧，同时又通过呼吸作用消耗分子氧。

在通常情况下，空气中氧的平均含量变化很小，所以陆生植物总能得到充足的氧。相反，在土壤和水中则常发生氧的缺乏。在内陆的海域和海湾，深层可能没有氧。

空气中的氧平衡可以通过消费者、转换者以及生产者的呼吸作用、森林火灾、灌丛失火以及其他燃烧作用等而实现。这些作

用的进行都要利用生产出的氧和有机碳。

氧、碳、氢等元素的循环是紧密联系在一起的，不可能独立地研究某一元素的整个循环过程。空气中二氧化碳含量增加，必然消耗大量的氧。两者增加和减少到一定限度时，就破坏了二氧化碳和氧的平衡，对动植物的生长和人体健康造成威胁。要改变这种状况，就应使用植物这一环境中二氧化碳和氧的调节器，以吸收过剩的二氧化碳而放出氧。因此，要维持城市及工矿区的二氧化碳和氧平衡，考虑到人的呼吸及燃料燃烧等，每人至少需要20平方米的森林或100平方米的草坪。目前世界各主要城市大都低于此限。

氧是植物生存、生长、发育的必需因子。植物的呼吸主要是有氧呼吸。生物界所需的能量，主要是靠氧化代谢产物。大气中氧的另一作用是，一部分氧将在高空发生聚合作用，从而形成一个臭氧（$O_3$）层，臭氧层能保护地球表面免受短波紫外线的照射，使地面生物免遭短波光的伤害。

## §2 大气污染与植物

大气是包括固体尘埃在内的混合气体，成份不是固定不变的。

工农业生产的不断发展，使大气中许多元素的含量大大超出生命所需的阈值，直接或间接地对生物造成危害，污染了人类及动植物赖以生存的大气环境，给农业生产带来了巨大损失。随着污染物排放量的增加，污染物种类不断增多，对地球大气造成的污染程度逐渐加重。

### 一、大气污染的种类

大气污染是指由有害物质排入大气，破坏生态系统和人类正常生活条件，对人和物造成危害的现象。大气污染可以是人为的，也可以是因自然因素引起的，如火山爆发、地震、风暴等。不过人们更多地注意人为的污染，其污染源主要有：①由燃料燃烧、交通运输工具、工业生产工艺过程及工业用水所产生的工业污染

源；②由农药、肥料及农业废弃物所造成的农业污染源；③由生活燃煤、生活污水、生活垃圾等所形成的生活污染源。

大气污染种类繁多，对农业有危害的主要有：

（1）具有氧化作用的污染物，如臭氧、过氧乙酰硝酸酯及其同族体、二氧化氮、氯气等；

（2）具有还原作用的污染物如二氧化碳、醛类、硫化氢、一氧化碳等；

（3）具有酸性作用的污染物如氟化氢、四氟化硅、氯化氢、二氢化硫、硫酸烟雾、氰化氢等；

（4）具有碱性作用的污染物如氨；

（5）其他有机气体如乙烯、丙烯、乙炔等；

（6）固体粒子状物质如煤烟、粉尘等。

这些污染物以气态气溶胶或微粒状态存在于大气中，它们对植物的毒性不一，一般可分为三级：

一级：强毒性污染物，如氟化氢、臭氧、过氧乙酰硝酸酯(PAN)等，在空气中的浓度从1ppb到数十个ppb时，即产生危害。

二级：中性污染物：如硫化物（二氧化硫，三氧化硫，硫酸雾）、氮氧化物（二氧化氮，一氧化氮、硝酸雾）等，对植物危害的浓度是数百个ppb到几个ppm。

三级：弱毒性污染物，如氨、氯化氢、硫化氢等，只有浓度达到几个ppm到数千个ppm时才能造成危害（表5.3）。

## 二、大气污染对植物的危害

### （一）危害的途径及症状

叶片是植物与周围空气进行气体交换的最活跃部位，也是最敏感的器官。空气污染物主要通过气孔有时也通过水孔进入植物体内，所以植物的受害部位首先是叶片。

大气污染对植物的危害，一是伤害，二是损害。伤害是指植物对空气污染所产生的可识别和测量的反应；损害是指污染物对植物的预期利用或产量造成可识别和测量的不利影响，它取决于

表5.3 影响植物生态系统的主要污染物、次要污染物及混合污染物

| 污染物 | 一般来源 | 植物毒性浓度(ppm/hr) |
|---|---|---|
| 主要污染物 | | |
| 光化学氧化剂 | | |
| 臭氧 | 内燃机 | 0.04—0.7 |
| 硝酸盐 | 内燃机 | 0.004—0.01 |
| 氮氧化物 | 燃烧炉及内燃机 | 0.21—100 |
| 硫氧化物 | 燃烧炉(煤或油)、其它工业过程 | 0.1—0.5 |
| 氟化物 | 铝、磷酸盐的生产、制砖、粉末冶金 | 0.0001 |
| 次要污染物 | | |
| 氨 | 各种工业过程(外溢) | |
| 硼 | 同上 | |
| 氯 | 同上 | |
| 乙烯和丙烯 | 内燃机 | |
| 氯化氢和盐酸 | 各种工业过程 | |
| 颗粒物和重金属 | 燃烧炉、各种工业过程 | 0.0005—10 |
| 硫酸钠 | 燃烧炉 | 不定 |
| 混合污染物 | 各种污染源 | |
| 臭氧和二氧化硫 | | |
| 臭氧和过氧硝酸乙酰酯 | | |
| 二氧化硫和二氧化氮 | | |

植物的产量和经济用途被降低的程度。植物某一阶段所出现的伤害，不一定必然引起减产。

大气污染对植物的危害，又分为能使植株产生特有伤害症状的可见危害和在外表看不到症状的不可见危害。可见危害又有急、慢性之分。急性危害是指浓度高、毒性强的有害气体使植物在短时间内（1—2天或更短时间）受害，叶片上迅速出现伤斑（枯斑），植物组织局部坏死，从银灰色变为褐色，且随着叶龄增大

还会发生褪色，变成浅黄褐色或白色，叶面边缘或叶脉间绉缩，严重影响作物的生长、发育，造成减产、失收。慢性危害是指植物长期接触低浓度污染物，缓慢出现发育不良，叶片轻度褪绿，造成一定程度的减产。急性和慢性危害常常同时发生于同一植株上。

不可见危害，也称无症状危害，是指植物接触低浓度的大气污染物后，外表虽不出现任何伤害症状，但影响植物的生理机能，抑制生长、降低产量。

从危害形式上，大气污染对植物可以产生化学作用和物理作用。化学作用表现为污染物进入植物细胞中与内含物起化学反应，发生一系列变化，破坏叶绿体，影响植物的光合作用、呼吸作用、受精过程、酶的活性等代谢过程，以至影响生长发育，降低产量和改变品质。物理作用指的是以飘尘形式存在于空气中的重金属毒物及氟等污染物。被植物吸收后，堵塞气孔或侵入体内，填塞细胞间隙，引起机械损伤，或残留在农产品中，造成粮食、蔬菜污染，失去食用价值。

（二）几种主要污染物对植物的危害及临界剂量

不同的污染物对植物的危害不同，同一污染元素其存在形态和化学价态不同，对植物的毒性也不同，单一污染与复合污染对植物的影响也不同。大气污染多数是多种污染物共存的复合污染，它们对植物产生的总作用称为联合作用，其对植物的危害有增效、拮抗、相加和独立的作用。

污染物浓度和接触时间的联合作用，称为“剂量”。植物伤害的最低剂量，称为临界剂量（伤害阈值）。不同污染物危害植物的临界剂量是不同的，同一污染物危害不同种类的植物，临界剂量也不同。但浓度比时间更为重要。

1. 二氧化硫的危害性

二氧化硫对植物的危害多发生在“功能叶”片上。首先从气孔周围的细胞开始，逐渐扩散到海绵组织细胞，再到栅栏组织细胞，表现为叶绿体的破坏，组织脱水并坏死，在形态上形成许多

褪色的"烟斑"。二氧化硫对植物的生理影响主要有①刺激气孔不正常开放或关闭，影响正常的生理机能，保卫细胞被麻痹，不能再可靠地控制蒸腾作用，导致植物因大量蒸腾而迅速枯萎；②叶绿素中的叶绿素A比B明显减少，光合作用明显降低(图5.7)；

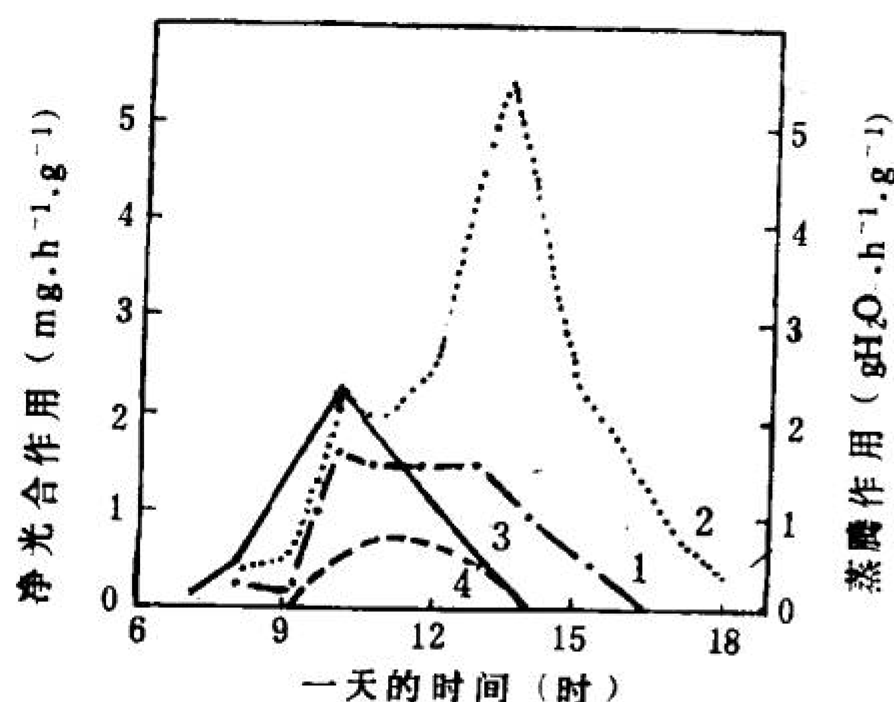



图5.7　受$SO_2$损害的云杉（虚线）与未受损害的对照图
（图中蒸腾作用：1.对照；2.受$SO_2$损害的；光合作用：3.对照；4.受$SO_2$损害的；）

③新陈代谢受到干扰，呼吸作用在初期迅速增加，随着伤斑的发生和扩大，又迅速减少；④使非还原糖减少，总蛋白质含量下降，氨基酸总量，特别是谷氨酸和天冬酰氨减少更明显；⑤花是抗性较强的器官，常在叶片已受害的情况下仍保持完好和继续开放，但花粉的萌发和花粉管的伸长受到影响，从而影响到正常的授粉和受精，种子发芽率也明显降低。

植物受害与生育期也有密切关系。当二氧化硫浓度不大时（1—10ppm)，分蘖期受害最重；高浓度（25—100ppm）时，孕穗期受害最重；成熟期一般受害较轻。同样浓度的二氧化硫对不同生育期的影响不一（图5.8）。不同植物对二氧化硫的敏感性不同，一年生草本植物中以紫花苜蓿、大麦、棉花等最敏感；在落叶树中，以连翘最敏感；在常绿树中，以西伯利亚柏、云杉等最敏感。使植物产生5％伤害的二氧化硫临界剂量见表5.4。

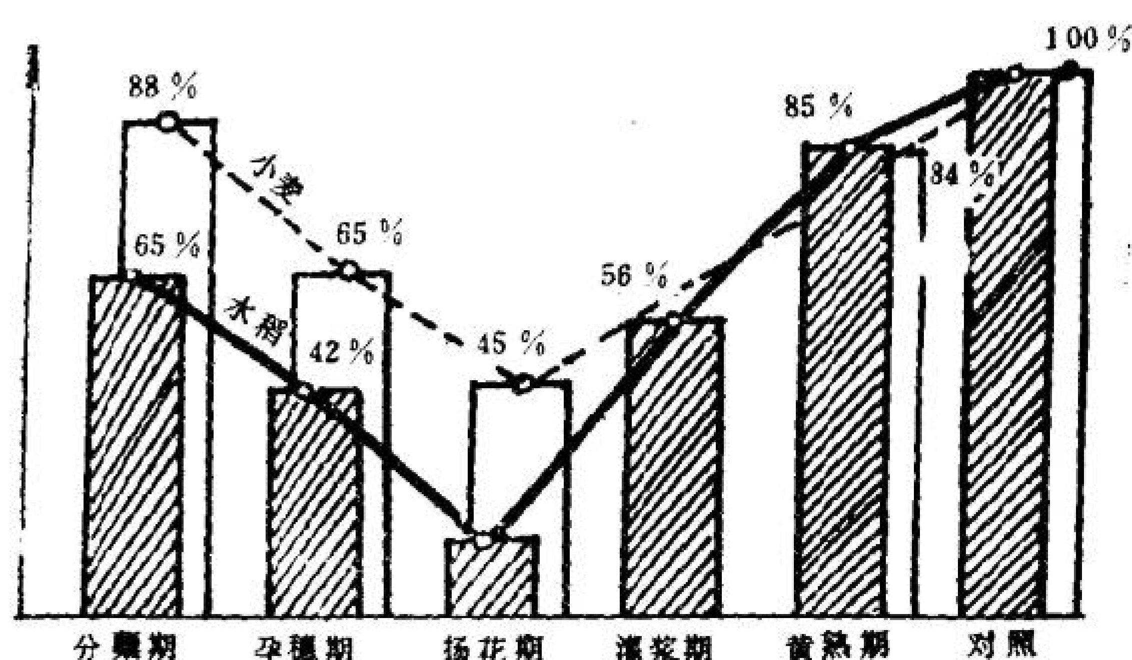



图5.8 同样浓度的$SO_2$在不同生长发育阶段对水稻、小麦产量的影响

(1973—1974)(江苏植物所，1976)

**表5.4 使植物产生5%伤害的$SO_2$临界剂量**

| 接触时间(h) | 产生5%伤害所需浓度(ppm) * | | |
|---|---|---|---|
| | 敏感植物 | 中等植物 | 抗性植物 |
| 0.5 | 1.0—4.0 | 3.5—10 | ≥9.0 |
| 1.0 | 0.5—2.5 | 2.0—7.5 | ≥7.0 |
| 2.0 | 0.3—2.0 | 1.5—5.0 | ≥4.5 |
| 4.0 | 0.15—1.25 | 1.0—3.5 | ≥3.0 |
| 8.0 | 0.10—0.75 | 0.5—2.0 | ≥1.5 |

* 1ppm = 2.62mg/m³(25℃时)

2. 氟化物的危害性

氟化物对生物的毒性比二氧化硫大10—100倍。大气中含1—5 ppb氟化物，经较长时间接触，即可使敏感植物受害。危害症状与二氧化硫相似，不同之点是，氟化物的危害多发生在幼芽、幼叶上，可使幼芽、幼叶脱落、枯萎或引起落花、落果。氟化物对植物危害的原因，是它与叶片中钙质发生反应形成氟化钙，干扰酶的作用，破坏叶绿体和原生质，失水变干。不同种类植物对HF的敏感性与$SO_2$不同，如唐菖蒲对$SO_2$抗性很强，但对HF很

敏感；茄子、番茄、紫花苜蓿对$SO_2$很敏感，而对HF却有较强的抗性。HF危害植物的临界剂量见表5.5。氟化氢有一独特之处是

**表5.5 HF危害植物的临界剂量**

| 接触时间 | 产生5%伤害所需要的浓度($\mu g/m^3$) | | |
|---|---|---|---|
| | 敏感植物 | 中等植物 | 抗性植物 |
| 8小时 | 2.0—6.0 | 5.0—30 | ≥25 |
| 12小时 | 1.5—5.0 | 4.0—27 | ≥22 |
| 24小时 | 1.0—4.0 | 3.0—20 | ≥15 |
| 1周 | 0.75—2.0 | 1.5—8 | ≥7 |
| 1个月 | 0.5—1.0 | 1.0—5 | ≥3 |
| 生长季节 | 0.3—0.7 | 0.5—2 | ≥1 |
| 1年 | | 0.2—0.5 | |

它能积累在叶片中，尤其是积累在叶缘和叶尖里，人们可借助叶片组织分析来评价氟化氢对植物的影响。

3. 臭氧的危害性

光化学作用产生的氧化剂如臭氧和过氧乙酰硝酸酯对植物危害性很大。臭氧危害症状一般出现在成叶上，首先危害叶片中栅栏组织，然后影响海绵组织，呈现出各种色素斑、膜质斑、褪绿斑和坏死斑等。由臭氧伤害或致死的栅栏细胞组成的细小的枯斑和点状斑统称为“点斑”和“刻斑”，这是被臭氧急性伤害的一个标志。

臭氧对植物的伤害主要表现在①对生长的抑制及器官的脱落，可抑制根、茎的生长和发育，抑制花粉的发芽，引起落叶落果等；②使光合作用下降，呼吸作用增强，氧化磷酸化受抑制。

臭氧对植物伤害的临界剂量见表5.6。

4. 过氧乙酰硝酸酯的危害性

过氧乙酰硝酸酯对植物的伤害常发生在最幼龄叶片的尖部及一些仍很敏感的老龄叶片的基部。受害初期，叶背面呈现银灰色或青铜色，严重时变成褐色。中老龄叶形成一条横带，中龄叶横跨叶片中部，老龄叶横亘于叶片基部。若继续受害，叶组织就会

表5.6 $O_3$伤害植物的临界剂量

| 接触时间（小时） | 能引起伤害的$O_3$浓度（ppm） | | |
|---|---|---|---|
| | 敏感植物 | 中等植物 | 抗性植物 |
| 0.5 | 0.15—0.30 | 0.25—0.60 | ≥0.50 |
| 1.0 | 0.10—0.25 | 0.20—0.40 | ≥0.35 |
| 2.0 | 0.07—0.20 | 0.15—0.30 | ≥0.25 |
| 4.0 | 0.05—0.15 | 0.10—0.25 | ≥0.20 |
| 8.0 | 0.03—0.10 | 0.08—0.20 | ≥0.15 |

* 1ppm=1.960μg/m³（25℃时）

坏死。对阔叶植物来说，叶片的背面可能出现水渍斑，最后能变成釉状，或呈银灰色。对窄叶植物来说，叶片上会出现褪绿或漂白的条纹。一般浓度在0.2ppm以上，植物受害。

5. 乙烯的危害性

乙烯是植物的一种内源激素，也是一种明显影响植物生长发育的大气污染物。作为一种内源激素，植物整个生育过程中，乙烯都参与并起着重大的调节作用。但作为大气污染物，它影响着植物生长、生殖的各过程。如抑制植物茎、叶和叶柄的伸长或由于异常的生长而在叶柄处向下弯曲，若在植物发育早期受高浓度乙烯伤害，会引起鲜重、干重降低，改变膜的透性，叶片、花、果实等器官脱落。乙烯伤害植物的临界剂量见表5.7。

表5.7 乙烯伤害植物的临界剂量

| 反应类型 | 浓度(ppm) | 接触时间 |
|---|---|---|
| 落　叶 | 0.3—0.6 | 5—30天 |
| 落　芽 | 0.1 | 8小时 |
| 花瓣脱落 | 0.5 | 1小时 |
| 叶片黄化 | 0.6—2.0 | 1—30天 |
| 萼片干枯(兰花) | 0.005—0.1 | 8—24小时 |
| 偏上生长 | 0.001—3.0 | 3—20小时 |
| 抑制生长 | 0.6—3.0 | 30天 |
| 抑制开花 | 0.1—1.0 | 20小时—3天 |

6．氮氧化物的危害性

氮氧化物在空气中的停留时间很短暂，它们只是局部的污染物。它们除参加生成臭氧的反应外，在这些氮氧化物中，一氧化氮和二氧化氮对植物有危害性，后者毒性较强，二氧化氮是唯一能被人看见的气体污染物。一般说来，氮氧化物对植物构成危害的浓度要比臭氧或二氧化硫等为大。许多氮氧化物的环境浓度非常小，不会造成明显危害。临界剂量见表5.8。急性的二氧化氮伤害类似于急性的二氧化硫伤害。有碳氢化合物的蒸气存在时，二氧化氮能生成硝酸过氧化乙酰及其类似物。这些污染物甚至在很低的浓度下，对植物也有很严重的效应，是一种催泪剂，对哺乳动物有剧毒。

**表5.8　$NO_2$伤害植物的临界剂量**

| 接触时间 | 产生 5 %伤害所需浓度(ppm)* | | |
|---|---|---|---|
| | 敏感植物 | 中等植物 | 抗性植物 |
| 0.5 | 6.0—12 | 10—25 | ≥20 |
| 1.0 | 3.0—10 | 9.0—20 | ≥18 |
| 2.0 | 2.5—7.5 | 7.0—15 | ≥13 |
| 4.0 | 2.0—6.0 | 5.0—12 | ≥10 |
| 8.0 | 1.5—5.0 | 4.0—9.0 | ≥ 8 |

*　1 ppm＝1.88mg/m³（25℃时）

混合污染物对植物的危害，研究表明，臭氧和二氧化硫共存时会增大受害程度，尤其当两者浓度较低时，增效作用更明显。过氧乙酰硝酸酯与二氧化硫共存时呈相加作用。先进行二氧化硫处理后再进行二氧化氮处理呈增效作用，变换顺序则呈独立作用。但机制如何尚不清楚。据研究，除了二氧化硫与氟化氢混合污染物外，所有其他混合污染物对表观光合作用速率的抑制，都具有增效作用，而未见有拮抗作用。

（三）环境条件的影响

植物受污染物危害时，因物理、生物环境、生物体本身状

况、种类、品种、气象条件等不同，危害程度是不同的。主要表现在以下几个方面：

1．气象条件的影响

据研究，作物对污染的抗性随温度升高而减弱，所以大气污染害多发生于春、夏两季。这是因为春夏两季温暖，叶片的各种组织和细胞正在生长，呼吸作用强，物质积累多的缘故。空气湿度高时，叶片周围空气扩散慢，叶片气孔开张度较大，易受害，因此叶片随湿度增大而受害加剧。光强能影响气孔的开张度及其他生理活动，光强增大，二氧化硫、光化学烟雾等会加重对植物的伤害，因此，白天比夜间易受害，有人观察到二氧化硫的毒性在白天比夜间约大4倍，且常在11时左右伤害植物。总之，由于气孔的开闭受气象条件制约，因此，一切有利于气孔张开的因素，如较强的光照，适宜的温度、良好的供水条件及空气湿度，充足的土壤肥力等，都能起到加剧植物受害的作用。

风的大小、持续时间的长短，直接影响空气中污染物的浓度。大气中污染物浓度与污染源排放量成正比，而与平均风速成反比。因为风力加大，使单位时间内通过烟波断面的空气量增大和湍流扩散增强，起着稀释污染物的作用。风向、风速与污染情况可用公式：

$$污染系数=\frac{风向频率}{平均风速}$$

式中，污染系数是指某区域被污染的程度。此外，污染源下风向的有毒气体浓度要比上风向高得多，所以在选择厂址时必须注意当地的常风向，将厂址选择在居民点、农田的下风侧。

湍流是污染物垂直扩散的主要动力。当大气呈不稳定状态时，有利污染物扩散，特别是增强垂直方向的扩散。当大气处于稳定状态时，污染物向高空方向扩散较少，这时若风速也较小，会使污染物停滞和积累在近地气层，加剧污染程度和延长污染时间。

2．地形条件的影响

地形对局部地区的污染有显著影响。有毒气体常大量集结在气流易于停滞的盆地和谷底。国外发生多次严重的大气污染事件，多发在谷底和盆地。兰州地处谷地，污染物就不易扩散，是我国大气污染较严重的地区之一。

3. 土壤条件的影响

土壤水分含量下降，作物受害程度减轻。当植物处于萎蔫时，受害最轻，如在干旱条件下的烟草，可免受氧化剂的危害。土壤含氧过多，缺氧或营养不良，都会使氟化氢的危害加重。适量的氮肥能提高植物对二氧化硫的抗性。也有人研究表明，吲哚乙酸能促进氟的吸收，浓度越高，吸收越多。

**三、植物的抗性**

植物的抗性是指植物在污染物影响下，能不受害，或受害后能很快恢复生长，继续保持活力的特性。污染的大气进入植物体，其流量受位差（气体浓度差）和植物防止气体进入的种种阻力所制约，即气体流量是位差与阻力的比值。植物抗性的强弱主要取决于：

（1）气孔，单位面积上的气孔数、气孔的着生位置与植物抗性存在一定的相互关系。气孔数量少的抗性强；气孔凸出表皮外的植物，对大气污染较为敏感；气孔平展或略下陷的抗性中等；气孔下陷的抗性强；其周围有表皮毛的抗性最强。

（2）表皮细胞、角质层，叶片表皮细胞排列的紧密、有无复表皮、表皮的厚度以及细胞壁角质层厚度，都是决定阻力大小的因素。据廖志琴研究发现树木抗性与叶片、表皮层数、厚度以及角质层厚度基本呈正相关。

角质层的阻力远比气孔阻力大。福勒测定角质层对二氧化硫阻力是气孔阻力的2倍。但不同气体透过角质层的阻力不同，如二氧化硫通过角质层的阻力远比二氧化碳和水的为小。

（3）表皮毛，表皮毛覆盖于表皮上，污染气体进入叶片前，必须绕过表皮毛，因此表皮毛对阻挡污染气体，保护整个叶

片有一定作用。叶片表面有腊质层，也可增强植物的抗性。

（4）生理特性及再生能力，有些植物能吸收大量的二氧化硫或氟化氢，是由于其生理上具有转移、消耗、抗御污染物的能力。有的植物在不利条件下能关闭气孔，暂停气体交换使抗性增强。有人发现，叶片汁液的pH值与植物的抗性有关。碱性汁液对酸性气体具有中和作用。所以对二氧化硫、氟化氢等来说叶片汁液pH值愈高，抗性愈强。有些细胞膜透性变化不大的植物，能增强过氧化物酶和聚酚氧化酶的活性，保持较高的代谢水平，抗性较强。还有些植物（如构树和女贞等）在受到气体危害后易于恢复，表现出顽强的生存能力。

（5）其他形态特征，据研究，叶片草质的比非草质的抗性强，栅栏组织层数多和排列紧密的抗性强；海绵组织不发达，细胞间隔小、叶绿体数多、叶脉呈网状的抗性强；旱生植物较水生植物、单叶植物较复叶植物、常绿阔叶植物较落叶阔叶植物、落叶阔叶植物较针叶植物抗性强。同种植物对不同污染气体的抗性不一致，见表5.9。

**表5.9 植物对不同气体的抗性比较**

| 植　物 | 二氧化硫 | 氟化氢 | 二氧化氮 | 臭　氧 |
|---|---|---|---|---|
| 柑　桔 | 强 | 中 | — | — |
| 木　槿 | 强 | — | 弱 | — |
| 银　槭 | 强 | 中 | — | 弱 |
| 杏 | 中 | 弱 | — | — |
| 葡　萄 | 中 | 弱 | — | 弱 |
| 梨 | 弱 | 强 | — | — |
| 紫花苜蓿 | 弱 | 弱 | — | 弱 |
| 唐菖蒲 | 弱 | 弱 | — | — |

## 四、大气污染的防御

### （一）大气污染的监测

监测是指用仪器或指示生物来测定大气污染物含量。用指

示生物监测经济实用，只要大气中出现一定量的某种污染物，它们就发出警报信号，所以常把生物监测称为生物警报。但所选择的指示生物一定要对污染物较敏感（表5.10）。一些苔藓和地衣较高等植物更敏感，常用它们监测大气污染。

**表5.10　几种对有毒污染物有指示作用的植物**

| 污染物 | 植　　　　物 |
|---|---|
| $SO_2$ | 苜蓿、棉花、大麦、莴苣、核桃、复盆子、落叶松 |
| 氟化氢 | 唐菖蒲、玉米、郁金香、桃、杏、落叶杜鹃等 |
| 二氧化碳 | 番茄、莴苣、向日葵、杜鹃等 |
| 臭　氧 | 烟草、苜蓿、大麦、菜豆、花生、白杨、玉裂悬钓子 |
| 乙　烯 | 兰花、石饱、番茄、玫瑰、香豌豆、黄瓜 |
| 过氧乙酰硝酸酯 | 菜豆、番茄、莴苣、芹菜、大理花、矮牵牛 |

（二）控制污染源

控制污染源是清除污染的根本措施，主要是解决工业“三废”污染，改进工艺流程，用高效低毒原料代替高毒原料，改善燃烧条件，安装脱毒和集尘设备，控制排烟、排气的污染。为了减轻农药污染，要积极研究生物防治的方法。

（三）植树造林，净化空气

在农作物和树木中，有很多种类对污染有抵抗性和吸收性，所以在污染源附近种植这类作物和树木，既能绿化环境，又可避免大气污染。据研究，1公斤柳杉叶片，每天可吸收二氧化硫3克，柑桔叶片贮存的硫可高达叶片干物质的0.77%，对氟的吸收力也很强。

树木还可吸收铅、铜、醇等毒物，减少空气中细菌数量，对有害烟尘或粉尘也具有很大的阻留作用。一般树木的茎叶对铅等毒物的吸收量可达60ppm。许多植物如洋葱、大蒜等能分泌一种杀菌素，而桦木、银白杨、柠檬等均有杀死微生物的作用。据测定，森林阻留灰尘的情况，柏树林为12.80%，白桦林为10.59%，

云杉为3.2公斤/年·平方米，松树为3.44公斤/年·平方米，槭树和橡树混交林为6.8公斤/年·平方米。草地也有明显的减尘作用。

防污林的营造，要根据污染源的位置，当地盛行风向、地形等选择适宜当地栽种且具有高效吸收能力的树种构成包围式或隔离式林带，一般认为防污林结构以复层林为佳，即外层多种植乔木、亚乔木、下层用灌木。同时多培育草皮，尽量避免土壤裸露。

（四）伤害后的恢复方法

1. 消除烟尘，利用人工冲洗或其他方法将植物表面的漂落物冲洗掉。

2. 改善施肥，从改良土壤和施肥措施上，可以减轻植物被害程度。据研究，麦类、水稻施用钾肥可以减轻二氧化硫的危害，施用硅酸钙能减轻氟的危害，菠菜施钾肥，白菜、玉米施碳酸钙可减轻臭氧的危害。

3. 喷洒保护剂，叶面喷洒一些乳状化学剂，可减轻某些污染物如氟化氢、二氧化硫的危害。喷洒气孔开度调节剂OED，可减少叶片对污染物的吸收，但目前这些方法的应用还处于初级阶段。

## §3 风与植物

### 一、风的生态作用

（一）风对植物外部形态的影响

在常有盛行风的地区，如海滨沿岸、山区迎风坡面等，植株因常年受风的影响，在形态上会发生很大变化，主要表现在：

（1）植株低矮、树冠过分尖削、呈流线型的外形；

（2）叶子比正常叶小，常带有褐色或红色的斑点，尤其在叶片边缘；

（3）树干常向盛行风所吹的方向倾斜，较小的枝条成为屈

曲状，且整株植物以同样的状态发生倾斜；

（4）小的枝条很短，常有不规则的分枝，彼此互相交错；

（5）许多向风的枝条死亡，有时只在背风向看到新枝条和新鲜叶片、向风面只有根部或树干的基部发出的枝条能保持稍好的状态；

（6）树干的横剖面中心偏外，即向风面的直径比与风向成直角面的直径要大；在植物体的迎风部位往往可观察到起保护作用的隆起层，树皮慢慢变厚；

（7）在寒冷风大的迎风坡面，森林可能衰退而成为密灌丛，且进一步退化为分散的或孤立的垫状个体。灌木常呈匍匐状，草本植物呈垫状生长型。它们分枝繁茂，很象密灌丛中的小灌木，原来直立的植物在低洼处或有蔽护物的地方形成铺地状。

（二）风对植物体内部机理的影响

风对植物体内部机理最重要的影响是具有强烈的干燥作用。带走植物体表面及其附近的湿润空气层，加速蒸散，使植物干化。在静风中，蒸发作用只是一个扩散作用的过程，但有风时，甚至饱和差为零，也能加强蒸发作用。所以经常受风吹袭的植物，蒸腾远较在静风处的为迅速。

在平坦的地面上，蒸发速度随风速的平方根而增加。一般空气越干，风力越大，干化作用越明显。植物器官受风的作用不断摇摆也会促进植物的干化，这种影响对小型叶片尤为突出。风能使叶片弯转、摇摆，引起细胞间隙膨胀和收缩，迫使叶片内部饱和空气逸出，吸入较干的空气，加速植物体的干化作用。在风大、干燥环境里生长的植物，其生理、形态和解剖结构与遮风条件下生长的植物有很大的差别。

风对植物有益的影响是，在强烈的日照条件下，风使群体内温度与外界环境温度相平衡，并加快叶子蒸腾，降低叶温，避免日灼现象。风还是植物被动吸水的原动力，能使矿质盐分随水分从根部运至植株上部。风对植物的生长量也有直接影响。风使叶

片界面层变薄，减小二氧化碳进入植物体内的阻力，并改变植物叶片大小对生长量所起的作用。所以，有人提出了“特征尺度”的概念，即把风与叶片大小对生长量的作用紧密联系在一起。他们认为，风是绿色植物同化作用速率的一个基础变量，由风速影响而致的叶片特征尺度，是关系到整个植物体生长发育的不可忽视的因子。

（三）风的传输作用

大多数陆生植物依赖风力传播自己的传播体。它们借助于风力将花粉、孢子、种子、果实等传播体甚至整个植物体从一处移到另一处。传播体的类型主要有：微小传播体、带毛传播体、带翅传播体、带气囊的传播体、风滚型传播体和构起投掷作用的结构。

在空气中花粉、孢子等传播体的数量及被传送的方向与距离受恒定方向的制约。只有遇到旋风时，植物才有可能往反方向迁移。森林中，乔木盛行风播，而生活在静风小气候环境中的下层植物则风播相对少得多。风媒植物大都生长于开阔或裸露的地方，花小而不鲜艳、结构简单或退化，没有香味和腺体或缺乏花冠。

风还可帮助植物散播芬芳气味，招引昆虫为虫媒花传授花粉。风对一些鸟类迁移及对粘虫、飞蝗等远距离迁移也起决定性作用。风还可使污染物大面积传播。

**二、风对农业生产的危害**

（一）台风和大风害

风害指大风对作物的危害，包括机械损伤和生理危害。台风是我国东南沿海夏秋季节最主要的灾害性天气之一，其影响几乎遍及半个中国。但台风也有有利的方面，即可减轻伏旱。

风害程度不仅取决于风的强度，也因风向、刮风时间、天气状况及地形条件等而不同。伴有低温（如寒露风）、暴雨（如暴风雨）、干旱与高温（如干热风）的风的危害则是多因子迭加的结果。

风对农业生产的危害主要是：

（1）造成植物的机械损伤，损伤的程度，主要决定于风速、风的阵性以及植物对风的抗性等。阵风的破坏力特别强，很易造成植物的断枝折茎。尤其风前降雨，使根系松动，风倒现象更严重。狂风还可引起植物落花、落果、落铃、落荚、落粒或大片倒伏，尤其是草本植物，如小麦、玉米和甘蔗等，常导致向地面倒下。风害与作物生育期也有关，作物处在幼苗期，果树处在开花前期或着果初期，风害较轻。当作物已抽穗开花，或果树正在开花及着果后期，风害加重。生长中等的水稻进入成熟期后，若遇到1小时降水20毫米以上，大于5级风力持续3分钟以上时，容易倒伏，若单有大风而无降水伴随，危害较小。稻、麦等作物叶片被风刮破后，将影响光合作用，产量下降。特别在出穗前后，受害最重。对于棉花，在开花期遇有6级以上大风，蕾铃将大量脱落。大风还使一些树木沿年轮而割裂或严重弯曲等。

（2）大风，尤其是台风带来的暴雨，可引起山洪爆发、江河泛滥、破坏水利设施、带来水涝灾害。在沿海一些地区，巨浪与高潮可引起海水倒灌、淹没农田，并使农田盐渍化。含盐的浪花飞溅到空气中形成盐雾，可被风带到陆地上很远的地方（在大风暴中，盐雾的危害可波及70公里的范围）。它们喷洒在植物表面后，对某些敏感性植物将产生伤害。足以引起伤害的盐分含量（附着量与渗透量之和），不同植物不同，如温州密桔叶片为0.38—0.50克/平方米，水稻为每穗（设每穗有100粒左右）1.0毫克。盐分向植物体内渗透的速度夜晚较白天为快，组织结构不很致密的夏叶较春叶为快。损害时间多在4—11月气温较高时期，且以落叶树受害最重。

（3）秋、冬季冷空气南下时形成的大风常伴随低温、干燥，造成越冬作物异常落叶，抑制花芽分化，花器官发育不良，结实量降低或品质下降。寒风害常危害柑桔、麦类、油菜等越冬作物。以柑桔为例，寒风害的危害主要是：①叶片失水卷曲，叶

前缘裂伤，在低温下根部吸水能力变弱，基干发生气泡进入毛细管中，使水柱断裂，影响水分输送，促使叶片含水量的急剧下降；②叶片因大量失水和风的机械作用而大量脱落。特别指出的是作物体的损伤和干燥，是相互加强的。③加剧冻害。据报道，当风速每秒增加1米时，可使植株体温下降1—2℃，在寒风下，柑桔有些品种在-4℃左右即可能受冻害；④长期受风袭击，不仅使柑桔树冠小茎杆细，单株产量也明显减少。

久保曾对柑桔落叶与气象条件的关系进行分析，得出落叶率D（%）的表达式：

$$D = d(u-a)(b-T)+c \tag{5.15}$$

式中，u为最大风速（m/s）；T为平均气温（℃）；d（=0.1—0.15）、a（=6.5—8.0）、b（=15）、c（=0.25）均为常数，因时期不同而异。实际上，寒风害与冻害往往是一起发生的，两者相互助长，加深了受害程度。

干冷的寒风还加速农田蒸发，加剧干旱的危害。华北春旱严重的地区，大风常常是主要因素之一。风对麦类作物的危害机制可用图5.9概括。

（4）风与农作物病虫害的关系主要表现为：①风是作物某些病虫害侵染循环的必要外界条件；②风是某些病虫害的媒介。风可以把病原菌作远距离输送，一些成虫或虫卵常借助风而迁飞到另一地区危害。所以大风过后往往使虫害大面积发生。③大风造成的植物机械损伤，为病原菌从伤口进入植物体提供了条件。大风过后，稻白叶枯病、胡麻叶枯病及稻瘟病常大面积发生。

（二）风蚀

在干旱、半干旱地区，风蚀对农业生产是一个严重威胁。在非州，西起毛里塔尼亚，东止索马里，跨越10多个国家的全部或部分区域，是沙漠化最严重的地区。其发生原因，除干旱少雨外，主要是风的作用。我国北部和西北地区，风蚀也十分强烈，近半个多世纪以来形成的沙漠化土地约5万平方公里。在东北嫩

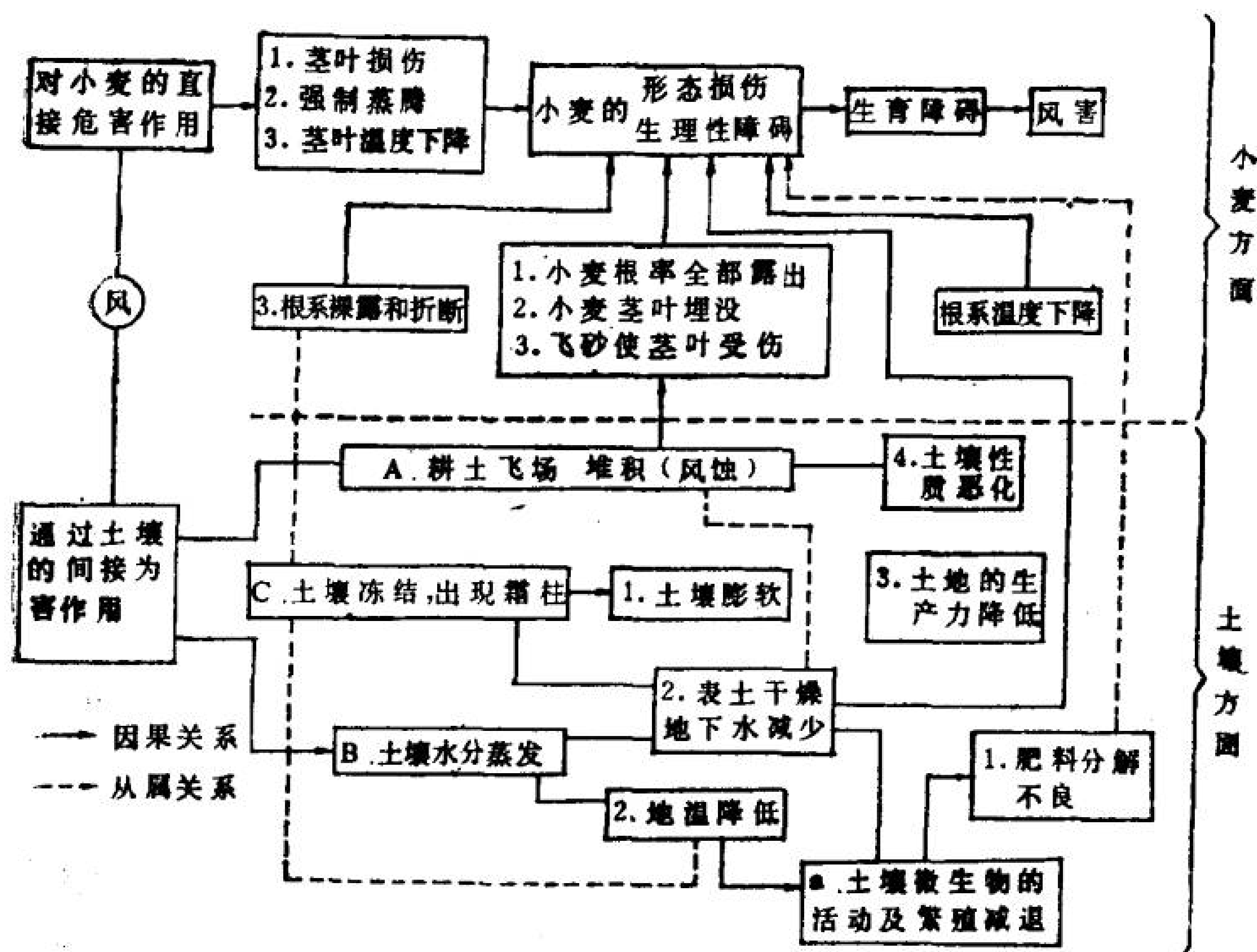



图5.9 麦类作物受风害侵害的机制（坪井）

江下游，吉林西部和黄河故道等地区，由于河流冲积沙层和干河床提供沙源，风蚀沙化发展较快，已出现以斑点状流沙为主的沙漠化土地。

土地沙漠化过程一般是先从地表风蚀开始，经过风化，片状流沙发育和形成密集沙丘。风蚀地貌主要是由风和风沙的侵蚀、磨蚀作用形成的。特别在干旱地区，暂时性的流水作用，风化作用对风蚀地貌的塑造起着积极的影响。如干旱地区的暴雨产生洪流冲刷地面，形成许多冲沟，为风蚀发展创造了有利条件。同时，在干旱气候条件下，气温的日、年较差都很大，使岩石的物理风化作用非常剧烈，加上盐化作用，岩石崩解而变得疏松，也给风蚀破坏提供了条件。在农田，大风把肥沃土壤的颗粒吹走，使表层土壤剥蚀，种子裸露或被吹走缺苗，甚至使作物干枯死亡。在冬季，对于休闲地或种有冬麦等覆盖度较小的田地，表土剥蚀现象

更为严重。

风蚀的危害程度因风速大小有不同；也因地形、土质和土壤水分而有不同；土壤的物理、化学性质和植物状况也决定土壤的抗风蚀能力；其中，土粒结构的稳定性，土粒的大小和土壤含水量更有重大影响（表5.11）。

**表5.11 土壤机械组成对风蚀强度的影响**
**（新疆皮山新垦荒地）**

| 土壤性质 | 有机质(%) | 粒度组成(毫米) | | | | 风速(1米高处)(米/秒) | 风蚀量〔千克/(米²·小时)〕 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 0.25—0.05 | 0.05—0.01 | 0.01—0.001 | <0.001 | | |
| 沙土 | 0.18 | 70.0 | 28.0 | 1.0 | 1.0 | 7.3 | 5.07 |
| 沙壤土 | 1.04 | 34.5 | 52.5 | 10.5 | 2.5 | 8.4 | 0.90 |

表5.11说明，在相似风速条件下，松散无结构的沙土要比结构稳定的沙壤土的抗风蚀能力低得多。据调查，有些地方当表土含水量超过30%时，即使风速达到10米/秒，也较难产生风蚀现象，但当含水量低于10%时，风速只要达到4—5米/秒，土壤即开始被刮走。因此，能引起土壤干燥的晴天，高温和有风等天气情况均与风蚀有关。其关系可用下式表示：

$$E_p = \frac{u^2}{w_s} \qquad (5.16)$$

式中，$E_p$是土壤侵蚀度；u是风速；$w_s$是土壤有效水分含量，它取决于降水和温度，其方程为：

$$w_s = \frac{s}{T^2} \qquad (5.17)$$

式中，s是已知时间的降水，T是已知时间内的气温。

### 三、防风措施

防风措施根据性质可概括为两类，一类是使作物免受风害的措施，如营造防风林、设置防风篱等。兴建防风林虽是有效的措

施，但需要一定时间才能发挥作用。设置防风篱是当前防风的主要方法，有占地少，兴建方便的优点。它的防风效应主要取决于篱高、作物离篱的远近及被保护作物的株高、抗风性、密度、当地盛行风向的稳定程度等。一般可保护篱高30倍范围内的作物免受风害。选择背风地点种植也是有效措施。在山区和丘陵地区，选择背风向阳的山坡、山窝，更好地利用树林是减轻风害的有利措施。

一类是加强作物本身对风害抵抗能力的措施，主要有：

（1）选择抗风作物与品种。不同作物，不同品种抗风能力差异很大。对农作物来说，一般生长矮壮、节间粗短、不易落粒的禾谷类作物比高大、纤弱、易于落粒的作物或品种抗风力要强。深根的、主要产品埋藏在地下部分的较浅根的、产品易受风害的耐风。对树木而言，材质坚硬、根系深的树种，抗风力强。根系浅、材质脆软、树冠大或易感染心腐病的树种，易遭风折以至风拔。

（2）改善栽培措施。如深耕可以加深根系的活动层，有利于支撑植株的地上部分。培土可以降低植物的重心，加固根部土壤而加强抗风力。

灌溉后土壤松软，易于倒伏，因此大风来临前不宜灌水，特别是不合理的漫灌，风倒现象极严重。若采用先进的灌水方法如沟灌、隔行沟灌等，由于增强植物组织因而也能增加植株的抗风能力。水稻栽培上的灌水护秧不仅御寒，也能防止大风的有害作用。

合理密植稀植时，植株间空隙大，植株没有依靠，容易倒伏。密植时，植株间空隙小，不仅风不易刮入且植株互相依靠，有利抗风。

（3）支撑。支撑防风是果园菜园普遍应用的防风措施。

此外，冬季在田间留茬、埋风障、打防风墙，掺杂粘土质土壤或撒播膨润土，洒水、压实等，既可减轻风蚀，又可积雪保

墒。有些地区，保留植被也可降低风速，并消耗大量风能。扎根土壤中的植物残体和根系也有助于强化土壤剖面而减少风蚀。

## 参 考 文 献

〔1〕林昌善、吴明编著，环境生物学，中国环境科学出版社，(1986)。
〔2〕牛文元编著，农业自然条件分析，农业出版社，(1981)。
〔3〕王天铎主编，光合作用与作物生产译丛，（2）、（4），农业出版社，(1980)。
〔4〕云南大学生物系编，植物生态学，人民教育出版社，(1980)。
〔5〕张志杰编著，环境保护生物学，冶金工业出版社，(1982)。
〔6〕傅克文编，农业环境的化学污染，农业出版社，(1985)。
〔7〕唐永銮编著，大气污染及其防治，科学出版社，(1980)。
〔8〕吴方正等编著，农业生态和农业环境保护，农业出版社，(1986)。
〔9〕孔国辉等编，大气污染与植物，中国林业出版社，(1988)。
〔10〕〔英〕A.R.米塞姆等著，大气污染（广东热带海洋气象研究所译），广东科技出版社，(1984)。
〔11〕〔日〕户刈义次主编，作物的光合作用与物质生产(薛德榕译)，科学出版社，(1979)。
〔12〕〔日〕坪井八十二等编，新编农业气象手册（侯宏森等译），农业出版社，(1985)。
〔13〕R.F.道本迈尔著，植物与环境（曲仲湘等译），科学出版社，(1966)。
〔14〕H.J.M鲍恩著，元素的环境化学（崔仙舟、王中柱译），科学出版社，(1986)。
〔15〕〔美〕J.B.马德等编，植物对空气污染的反应（刘富林译），科学出版社，(1984)。
〔16〕〔英〕J.I.斯普朗特著，固氮生物生物学（刘永定译），农业出版社，(1985)。
〔17〕〔英〕J.M.安德森著，环境生态学——生物圈生态系统和人（蒋志学等译），辽宁大学出版社，(1987)。
〔18〕〔西德〕W.拉夏埃尔著，植物生理生态学（李博等译），科学出版社，(1980)。
〔19〕〔美〕W.J.曼宁等著，大气污染的植物监测，（黄楚等译），中国环境科学出版社，(1987)。
〔20〕〔比利时〕P.迪维诺著，生态学概论（李耶波译），科学出版社，(1987)。

〔21〕 Szelcz.G.Instruments and their Exposure,Vegetation and the Atmosphere,VOL2, (1985).
〔22〕 Monteith.J.L.Vegetation and the Atmosphere VOL2, (1976).
〔23〕 Jonts.H.G.Plants and Mioroclimate: A quantitative approach to environmental plant physiology, (1985).
〔24〕 Hanan,J.J.,Plant and Environmental Measurement, (1984).
〔25〕 John,R.E.,Environment and plant Ecology,Second Edition, (1982).

# 第六章　农业气象模式

## §1　概　　述

### 一、农业气象模式

近代，特别是近20年来对作物光合作用、物质输送和能量转化的物理和生理过程的深入研究，以及高速电子计算机的应用，农业气象方面研究出许多仿真的生物数学物理模式，分别称为作物——天气分析模式、作物—土壤—大气模式等等。我们在这一章中统称为作物——农业气象条件模式（即农业气象模式）。

为了给出一个较明确的定义，必须先从模式或模型(Model)谈起。一个模式就是提供对一个系统的代表方式，因此它应当类似那个系统。模型就是指相似的东西。具体应用到农业气象中来，其目的是寻求农业气象规律的相似东西，是一种手段。有人定义模式是一种概念结构，是从具体复杂的现象中抽象出来的一种概括。模式是从实验所获得的资料着手，从一套虚构的前提出发，用演绎法，严格推理，得出逻辑结构，从命题到结果，整个是假设性的。用这种模式作为范型，测定现实的实例，推测它会出现的结果。可以认为模式是对实体特征及变化规律的一种定量的抽象，而且是对研究的特定特征的定量抽象。

实际上，从人文科学到数理天文学，都采用了模式的研究。虽然用这种方法研究的问题可以很不相同，但在基本方法和道理上却有很大程度的一致，因为一个模式提出了对一个系统的代表方式，模式的重要特征可能是比真实的系统更便于理解或叙述得更充分。模式一般是真实系统的简化。农业气象模式就是把研究的对象——作物、土壤、大气这个复杂体系中的各种问题模型化。

例1　水分循环

在农业气象系统中水分循环是很重要的研究课题，因为水分除了其本身具有生理作用外，与作物的养分循环以及水分循环也是分不开的，水分循环还把局部环境和地球生态系统结合起来。如图6.1所示，这是水分循环的图解。图中a为灌溉来水，z为土壤

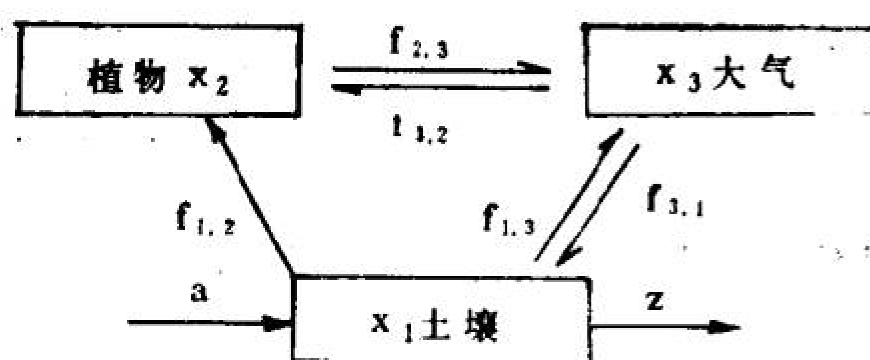



图6.1　水分循环图解

中下渗的水分，我们假定不产生地面径流，其中$f_{1,2}$，代表水分从土壤向植物的输送速率，$f_{2,3}$代表植物向大气的蒸腾速率。$f_{1,3}$为土壤蒸发速率，$f_{3,2}$为大气降水被植物截留的部分，$f_{3,1}$是大气降水向土壤中输送的速率。通过这样一个简单的示意图就把整个水分循环情况描述清楚，把一个极复杂的问题简化成一个图式，这就是图解模式。进一步的问题是要把这些关系研究明白。全面深入研究这些关系当然可能，但必须是一部分一部分地探讨。如取其中植物从土壤吸取水问题作进一步更深入细致的研究为例。

例2　植物根部吸水模式

假定一个根系（图6.2），要研究这植物根的吸水问题，从模式（定量计算）考虑，同样是千头万绪，也必须先简化一下。先假定这个圆锥形的根在土壤中分布是比较均匀的，可否研究一根根毛的吸水呢？当然可以。把一个根的吸水研究清楚，也就不难解决一个整体根的吸水问题。为此，第一步了解根在土壤中的分布（各层次的分布）。就某一层而言，则可以切一个剖面，在根中间切一刀，再从上面看下去，就得到一个剖面图（图6.3）。如图所示，其中黑点是根，每个小圆是根吸收的营养面积，如果是均

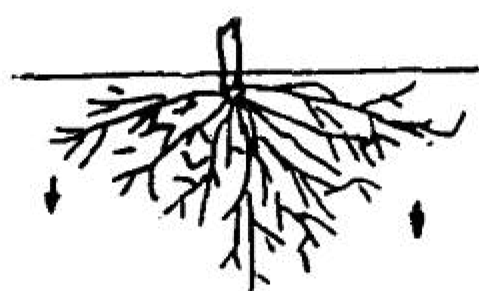


图6.2 根系示意图

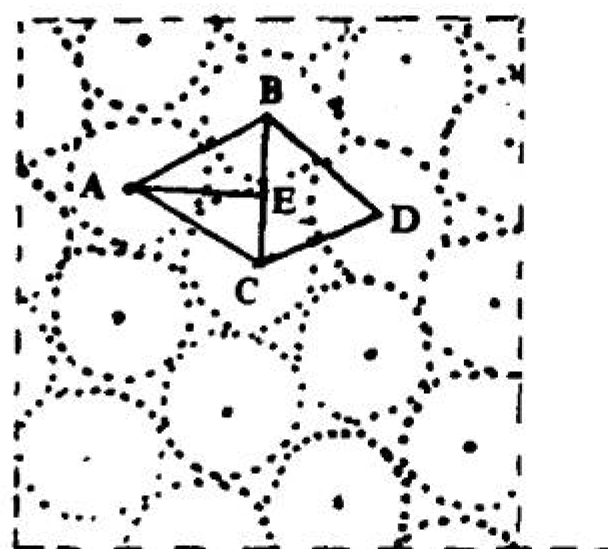



图6.3 土壤中根系横切面图

匀分布，则根与根之间的距离是相等的，连接起来则成菱形等边对称（由两个等边三角形组成）。计算菱形的面积

菱形面积 $=AB^2\cos30°$（因为高 $AE=AB\cos30°$）

整个根的面积，如果定为1个单位面积，则

$$1(\text{平方})=\Sigma(AB)^2\cos30°$$

被总根数除 $\dfrac{1}{N}=\dfrac{\Sigma(AB)^2}{N}\cos30°$

因为单位面积上的菱形总数为N，而每个根正是占有一个菱形，所以总和Σ等于N

则 $$\frac{1}{N}=(AB)^2\cos30°$$

$$(AB)^2=\frac{1}{N\cos30°}$$

$$AB=\sqrt{\frac{1}{N\cos30°}} \qquad (6.1)$$

AB即两根之间的距离

至此，第一步解决，便可求出在单位面积上所分布的根数，则我们就有可能研究一个根的吸水问题，研究它的模式就简化得多，第二步是研究根的吸水。

我们再简化一下，只研究圆内的水分变化，而各圆之间的小三角形的空隙忽略不计，则每个根的吸水区就限制在圆（半径为R）的范围内（r为水分移动dr后，根的吸水区域的范围，所以$R=r+dr$）（见下图）。

在圆圈上水分是不流动的，即每营养区内水分有变化而它们之间则无交换，因此圆周上渗透速率（通量）V＝0。

事实上根的吸水条件是变化的，其边界上条件也是变的，这里都作了简化。

在这样的简化下，我们考虑了滞后现象，得到如下表达式（模式）：

$$\frac{\partial\omega}{\partial t}=\frac{\partial V}{\partial r}+\frac{V}{r} \tag{6.2}$$

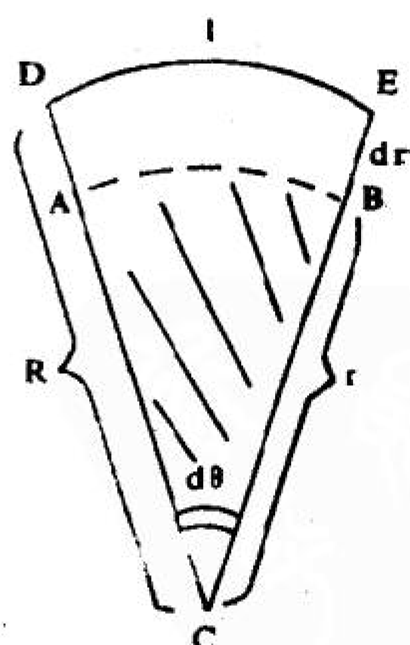
式中，$\frac{V}{r}$为滞后作用，其物理意义是很清楚的，因为$\frac{\partial V}{\partial r}$是空间上的变化，$\frac{\partial\omega}{\partial t}$是局地变化率。这变化率略有滞后。这在实际的推算中也是正确的。以下取根吸水区的一个部分作为示意，进行公式的推算。

$$S_{DEC}=\frac{(r+dr)^2 d\theta}{2}$$

$$S_{ABC}=\frac{r^2 d\theta}{2}$$

$$S_{ABED}=\frac{(r+dr)^2 d\theta}{2}-\frac{r^2 d\theta}{2}$$

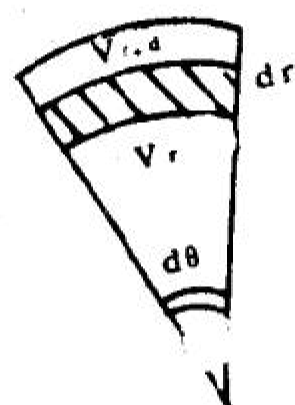
$$=\frac{d\theta dr}{2}(2r+dr)$$




因为$r\gg dr$

则 $S_{ABDE}=rd\theta dr$

在本问题中，$\frac{\partial \omega}{\partial t}$为单位面积中水分随时间的变化，则下图中斜线部分的变化为



$$\frac{\partial \omega}{\partial t} rdrd\theta$$

求得斜线部分中流入水量

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} r\,dr\,d\theta = V_{r+dr}(r+dr)d\theta - V_r rd\theta$$

$$= (V_{r+dr} - V_r)rd\theta + V_{r+dr}drd\theta$$

$$= \left(\frac{\partial V}{\partial r}\right)_{r+dr} drd\theta + V_{r+dr}drd\theta \qquad (6.3)$$

式中；$V_{r+dr}$为单位长度上流速，上面弧上的通量为$V_{r+dr}\cdot(r+dr)d\theta$；下面弧上的通量为$V_r rd\theta$。

经整理可得：

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{V}{r} \qquad (6.4)$$

作为根的四周吸水量q(t)，则

$$q(t) = \int_0^{2\pi} d\theta \int_r^R \frac{\partial \omega}{\partial t}(r) rdr$$

$$= 2\pi \int_r^R \frac{\partial \omega}{\partial t}(r) dr \qquad (6.5)$$

如果单位体积土壤中根总长为K，则单位时间吸 水 总 量Q(t)为

$$Q(t) = K\cdot q(t) = 2\pi K \int_r^R \frac{\partial \omega}{\partial t}(r) rdr \qquad (6.6)$$

根系的全部吸水量则为各层次吸水量的总和，是时间及整个根系空间的函数：

$$\Sigma Q(t) = \sum_V q(t,x,y,z) \qquad (6.7)$$

式中，V为总容积。

通过这两个例子即简要地说明了农业气象模式。

## 二、研究农业气象模式的作用

农业气象要解决的问题，从实际中可以列出若干。归结起来是由于某地区历年都不具有农业生产对象所要求的最优的综合气象条件。农业生产不高不稳，是由于人们对生产的要求不断提高，而气候资源在时间上和空间上都受到限制所致。在保证产量的原则下，要能估算输入和输出之比，以求获得高效率、高收益。

在没有完全掌握这种复杂关系之前，它是一个黑箱问题，我们需要阐明黑箱。如果某结构或过程可以实现，由黑箱产生的一定作用（输入和输出关系），此结构和过程就叫阐明黑箱。虽然灰箱不被系统科学所采用，但生物学方面的问题多为灰箱，即得到一定程度的阐明，尚有很多不明白之处，即不完全是黑箱。

事实上农业气象问题的研究潜力很大，只是由于影响因素很多，干扰复杂，单从研究天气、气候条件影响生物体产量的形成是困难的。

对待黑箱问题，用统计方法来阐明是可行的。所以农业气象中，到目前为止多为回归分析。这就是用平行观测资料，定量对比分析，得到一系列回归方程。这些统计结果很值得推敲。J.R.胡认为：遗憾的是"观测值"是用以形成公式的，象"预报值与观测值一致"这样的说法都被许多人接受。他还认为：回归技术的误用，解释错误，已使许多结果无用，而且导致应用中的错误标准。回归统计的一种最常见的错误应用是r（相关系数）的说明，不提及观测值数目和分析中所用变量数目，因为r随观测值数目减少和自变量的增加而自动增加；另一方面，如果严格遵循回归统计的前提，则在植物—气象分析的问题中就不能用这样的方法。因为许多试验数据不符合"正态分布"，各变量间有相关性（不独立）等，所有这些都不能满足回归分析的要求。

根本的问题不是给客观条件评价，而是明确表示在现实条件下应取得最佳结果，从策略观点来研究农业气象问题。古农谚中

关于小麦播期有白露（9/上）秋分（9/下），寒露（10/上），霜降（10/下）和立冬（11/上）的说法，南北各地最佳播种期不一，这是掌握气候规律，确定适宜播种期的一种最优决策。若用现代科学去研究，就涉及到运筹学的对策论问题。最有名的例子是齐王与田忌赛马，实际上双方对阵就是要用自己的最优策略打败对方。农业气象是和“天”对策，这是一种包含随机因素的混合对策，人们的策略就是我们通常所知道的不同作物和农业技术措施等，“天”的策略就是天气和气候的变化。这种对策有一个特点，它是一种不保密的对策，问题是气象变化比较复杂，只要我们有精密的仪器进行探测，收集大量资料，进行分析计算，探索双方对策的关系，就可掌握这种规律，我们的对策最终是胜利的，且是逐步逼近最优结果。问题是如何计算、分析，以探索规律。当然只能随着科学技术的进步，由相对真理逐渐逼近绝对真理。

由上述可知，开展农业气象模式研究是非常必要的，而早年成果多属经验性的，这是因为在一定的条件下，定量分析和研究作物产量和天气条件之间的关系必然会遇到不少的困难，其原因如下：（1）潜在影响因子多而复杂；（2）作物对外界环境因子的反应是非线性的，而且这种反应随空间而变化；（3）外界环境因子之间是相互关联的，如湿度、辐射、降水、土壤湿度等是不完全独立的因子；（4）每个因子对作物的影响是非叠加性的，而是相互影响、相互组合的。（5）植物在其生长期内对环境因子反应的变化很大，即不同发育期的要求不同；（6）作物本身的发育状况和某些环境因子（如土壤水分）都有一定的保守性（即惯性因子），如光合作用面，根系的发育状况等。它们“记着”以往的条件并决定着发展的趋向，即表现出既往条件的影响，也决定着未来发展的方向。

所以G. 伊万斯(Evans)说，具有这种特点的综合体为“迷宫”，如仅根据田间试验资料的统计分析来说明这个体系的性质，这就如一个人置身迷宫之中寻找迷宫之门，因此除用统计分析的手段

解决一些问题外，必须寻找其他合适的方法。这就是农业气象模式研究的目的。它考虑近地气层和土壤气候的物理规律，以及环境条件对作物群体生长、发育、生产率影响的生物规律的综合结果(当然要利用现有的试验资料)，把产量形成的各个过程模式化，这就是农业气象模式的形成。

加拿大、美国、印度、苏联等已将农业气象模式交给有关业务部门使用。

**三、农业气象模式的意义和应用**

任何问题的研究，都要解决两个问题：发生了什么？发生了多少或怎样发生的？前者是一个定性的答案，后者是一个定量的答案。后者就要用模式进行研究。农业气象科学中有些问题用简单的逻辑推理就能满足要求，也不一定要用到数学符号（或目前的研究水平尚用不到），以免破坏其清晰性，例如区划中的一些问题，所以不是一切农业气象问题都要用模式来解决的。只是那些比较复杂的问题才要应用模式来研究。

模式的意义和应用是：（1）定量表示农业气象研究中的各种关系；（2）建立模式有助于进一步判断我们所缺乏的知识和数据（即研究不透彻的某几个侧面）；（3）建立模式能激起新的研究思路和方法；（4）建立模式可以缩减不必要的试验；（5）与传统方法比较，模式能更好地利用数据（目前数据是越来越精确了，但也更昂贵）；（6）汇集不同资料和结果，得出综合性概念；（7）模式可给出内插、外推和预测，给人们决策的依据。

## §2　农业气象模式的研究方法

**一、研究原则**

（一）系统与系统分析

由于农业气象问题的复杂，所以把它比拟成黑箱问题，于是研究这个问题就引进了“系统”的概念。农业气象中最熟悉的是SPAS（土壤—植物—大气系统）。

系统首先是一个复杂体系。如何定义系统，尚难有统一的说法。

所谓系统分析，1975年贝斯瓦斯（Buswas）定义，一次分析研究以帮助决策者在一系列可供选择之中，分辨和选择作用最优的方法。

系统思想就是所说的系统观点，主要论点是一项事业无论如何复杂，如何庞大，总可以分为一些单位，最后总是由简单的单元(或元素、元件)组成，而这些单元是相互联系、相互影响的。在研究一项专题时，总有其明确的目标，而组成系统的各个单元也有与总目标相统一的相应目标，这就是说，系统内各单元之间的关系是为了达到统一目标而分工合作的关系。按照系统的思想来分析问题就是系统分析。系统分析不仅要研究清楚系统与环境之间、系统与其他系统之间，系统内部各部分之间定性和定量的关系，并用一个适当的表达式来表示这种关系。这样处理自有不少方案，而用系统的观点，可求得一个最佳方案。最后，这个最佳方案拿到实验中去验证，检验是否达到预期效果。必须注意，最佳方案是辩证的，是在一定时间、地点等具体条件下的产物。

系统分析的手段是古老的，过去由于手段不够，定量化实验有困难。例如美国赫狄（E.O.Heady）制定了一个农业系统模式，有四百多个公式，二千多个变量，用一般方法无法按时算出结果。由于计算机问世后，才有可能实现，系统分析才能在各方面发挥其日益重要的作用。现在奥地利设有一个非官方的多学科研究机构——国际应用系统分析研究所，它在农业上进行了很多方面的研究。我国在1979年也成立了系统科学研究所。系统分析的应用主要目的是达到最优化。

（二）模式与数学表达式

除了前面介绍的指导思想外，解决实际问题时还要选择一个适合模式。从形式上看，可以用“文字”模式（事实上文字模式

是基本的准备工作），但单纯文字模式有困难。因为（1）试图定义一些复杂的关系时，文字模式就不能表达许多连续性关系，特别是反馈作用的描述更加困难；（2）同样一个词，在有关问题中同一个组成不一定有相同的含义，虽然很小心地定义它（事实上一经定义就已经成为符号），但另外人用时，可能从广义上去理解，超出原来比较狭义的定义，例如“高杆作物”一词就在文字中难以统一标准。

数学表达式，其特征可以提供符号逻辑，可以表达最复杂的思想和关系，可以保持简单和最少的表达形式。它有很多优点：准确精练，用逻辑方法传递信息，并且准确地作出预报。它也有缺点，有时歪曲了实际情况，歪曲的东西是不适合的要素。在农业气象中也要正确地对待它的实用性。因为数学模式由一个方程或者一组方程组成。这些方程定量地表达对真实系统所作的假定和假说。它们可以解出所预料到的数值。用预计的数值与对真实系统所做的测定值进行比较和检验。但模式并不能提供完整的生物学或科学的内容，而是以定量的方式来表达或解释所做的假设，以便推演出它们的结论，并指出去何处寻求证实或否定这些结果。

## 二、农业气象动态模拟

农业气象条件的动态模拟是当前农业气象模式中主要方向。农业气象系统的特点是“交叉”影响的，农业气象条件动态模拟就是把这种复杂关系的演变过程表示出来。

过去我们用如下模式：

$$y=f(\overline{x}_1, \overline{x}_2, \cdots\cdots, \overline{x}_n) \quad (6.8)$$

动态模拟则为

$$\frac{dy}{dt}=\varphi(y, x_1(t), x_2(t), \cdots\cdots, x_m(t)) \quad (6.9)$$

式中，y作为时间t函数的产量（用植物生长量或有经济价值的器官作指标数）；$\overline{x}_1$，$\overline{x}_2\cdots\cdots$，$\overline{x}_n$为发育期间或所选时段平均农业气象等条件的特征值，$x_1(t)$，$x_2(t)$，$\cdots\cdots x_m(t)$作为时间函数研

究的农业气象条件的特征值。

上两式的差异：①第一式时间因子间接考虑；②第一式中平均值，平滑了许多信息，第二式是不同情况下不同变化；③$\frac{dy}{dt}$表示与y（当时作物的基础）和当时（前期）条件有关，其物理意义清楚；④m与n不同，m不会太大。

解微分方程的通用方法是求其数量解的差分形式。

**三、农业气象模式研究对象**

农业气象模式研究的对象就是土壤—植物—大气系统。其本质是属于生态系统的范畴。但就农业气象任务而言，则只注意农业生产对象与外界环境的关系，即注意近地面气层和土壤层中光、热、水、气等与农业生产对象的相互影响。

土壤—植物—大气系统有如下特征：

（一）系统和外界环境的复杂性

研究系统的中心环节是植物的总和——农业群落。活的组织可分为几级：生物圈、生物地理群落、群落、有机体、器官、细胞和亚细胞构造。在向较高等级过渡时，某些特征变得比较复杂。然而，正如奥杜姆（Ondm）所着重指出的，在由小系统向大系统过渡时，某些性质变得不太复杂和较少变化。例如，与玉米的个别叶片或植株的光合强度相比，玉米田的光合强度变化较小。

生物量组织的每一级都有本级特有的、单位间的特殊相互作用方式。认为其中一级比任何另一级更重要（或更次要）以及任何一级较易（或较难）于进行定量研究，是没有根据的。不注意较低级的结构水平的特征，便无法认识较高水平上现象的性质。然而，仅仅根据下一级所特有的规律性，是不能阐明本级的所有性质的。例如：种植或研究个别植株，不能预见农业群落的所有性质，但不借助于在器官（同化物的转移和利用）、细胞（水和矿物质的吸收）以至亚细胞（光合作用、呼吸作用）水平上所获得的知识，也不能建立起有内容的模式来。

系统内的无生命成分——土壤和大气也有其复杂的内部结构。然而在研究该系统时，只能在一个结构水平上对待它们，即当作实现物质输送和能量转化过程的完整环境。

现在来研究环境的基本性质：我们所关心的土壤—植物—大气系统与这个环境发生着不断的相互作用。土壤—植物—大气系统所处的外界环境的复杂性，首先是受其多因子性（多维性）制约的。土壤状况象大气状况一样，不能以某一个单一的参数来形容。例如，为了计算农业群落水分和热量状况的特征，必须以下列外界环境参数作为边界条件：空气的温度和湿度、太阳辐射强度、大气反射、风速、土壤温度和湿度等。

一般地说，外界环境因子对农业群落的作用不是累加的，而是由于其单优势性、协同作用、拮抗作用等现象而复杂化。单优势性：当一个因子处于最小值或最大值时，对系统产生如此强大的影响，及致压倒所有其余因子(干草原上水分亏缺、农业的霜冻)的作用。协同作用：两个或更多的因子对系统的相互增强作用。例如，在干热风情况下，温度和风速的相互作用。拮抗作用：两个或多个因子对系统的相互补偿作用。例如，高于正常的温度对群体生产力的不良影响，在很大程度上可能被高于正常的土壤水分所补偿；气温升高或风力加强对蒸腾的影响，可能被空气相对湿度所弥补。

对外界环境条件进行分析，还由于表示环境状况的个别参数间明显的统计学关系而复杂化。基本气象要素在时间上的波动是由于一般原因——天气过程（大尺度大气扰动的发生、发展和移动）所造成的。故此，个别气象要素之间存在极密切的相关。这种情况给按照实验资料评价数学模式的参数带来极大的困难。

外界环境的很多因子具有活动性，这种特性极端复杂。大多数气象要素具有时间变化的特点，包括：天气学最高值（与大约以 4 天为周期的振动相适应）、微气象学最高值（与大约以 1 分钟为周期的扰动相符）和划分得很广泛的中尺度气象学最低值(频

率的间距以几分钟到几小时为周期）。气象要素也受周期性变化——日变化和年变化的影响。

土壤中最重要的农业物理参数的变化，比气象要素的变化要小得多，而且土层越深，变化幅度越小。如15—25厘米深处温度的日变化已大大减弱。

气象要素的时间变化给土壤—植物—大气系统的模拟带来许多困难，若干与模拟有关的理论问题尚不清楚。例如微气象扰动有无重要的生物学意义？作物对气象条件变化（变化的周期与天气学最大值相似）的适应性反应，对产量有无明显的影响？

查明气象要素的日变化和天气变化，要求利用实时的观测资料，这会导致资料数量的急剧增加。此外，由于作物对外界环境条件的许多反应是非线性的，因此在许多情况下计算气象要素的日变化是很必要的。

（二）系统的非定常性

非定常性是土壤—植物—大气系统对外界环境条件作用做出反应的性质在时间上的变化。它可由多种情况造成。为了模拟的目的，需要分别研究产生非定常性的“质”和“量”的原因。质的原因是作物的发育，量的原因是作物的生长。

在个体发育过程中，作物对外界环境条件的要求是呈规律性变化的。当在温度、水分保证率等条件中出现临界期时，这一点便会反应出来。同样，在生育期间，重要生理过程的基本点不是固定不变的。在建立数学模式时，曾不止一次地尝试对植物在发育过程中质的变化进行计算。但这些过程研究的还不够充分，严重地限制着在模拟时对它们进行计算的可能性。

作物的生长过程是以如下方式决定着上述系统的非定常性的。（1）系统内部环境范围的增大——其上界和下界的延伸。（2）植物量（叶片、茎杆、根系）充满环境时，环境本身的特性也发生变化。随着作物的生长，系统内部环境范围内，植物量的比密度和比表面也有所提高。植物量的组成部分是热量、水分

和其他物质的源（或流）。这些源的能力是与植物量的比表面平行增长的。因此很自然，如果说出苗之日可以忽略作物对农田水分和热量平衡的影响，那末从封行之时起，植被在形成平衡方面开始起到优势作用。在封闭的草丛中土壤蒸发一般不超过总蒸发量的5—10%。

植被可以大大改变空气的温度场、湿度场，形成特别的风状况，截获大部分太阳辐射。还需指出，随着作物的生长，土壤—植物—大气系统变得较有惰性。根系向土壤较深的层次伸展，使农业群落对水分条件的短期剧烈变化不再那样敏感。

系统的非定常性是由作物生长所造成的，目前，非定常性颇受重视。

（三）系统的惯性

我们把外界环境条件与农业群落反应特性之间关系的性质，看成是植物量的日增长。除了日常的气象条件之外，农业群落植物量的增长是由许多惯性特性——叶面积、根系大小、土壤根层的含水量所决定的。叶面积、根系大小说明农田的经历—迄今为止环境条件适宜于种子发芽的程度。土壤含水量也有类似的特性。惯性因素状况对相应过程未来进程的影响程度，以所遇到的条件为转移。短时间充沛的降水，在某种情况下可以一直影响到生育期的末尾，而在另一种情况下，对它们的“记忆”在几天之内会象被通常的阵雨“洗濯”过一样不复存在。

注意生物学惯性因素诸如有效分蘖数、穗中小穗数、小穗中子粒数是非常重要的。它们在很大程度上决定着产量水平。

系统中存在着惯性因素给模拟带来困难。但是，产量预测方法发展的可能性，正是与这些因素的存在有关的。

（四）系统的非线性性

在模拟很多无生命现象时，线性近似法是完全有效的，这种描述与平衡状况无大偏差。在模拟生物学过程时，便出现了完全不同的情况。决定作物生产力的所有生物学过程与外界环境因子

的关系是非线性的。

以x表示我们感兴趣的一个外界环境因子，而y为作物对它的瞬间反应（例如，x为叶片温度，y为叶片的光合作用）。令y和x以函数关系$y=\varphi(x)$表示。假设函数$\varphi$是连续函数和微分函数，在对生产过程进行模拟时，常常需要评价一定时间间隔（小时、日）内，环境因子的平均值$\overline{x}$所对应的平均生物输出量$\overline{y}$（例如，光合作用）。在这种情况下，(6.10)式可以找出所出现的误差：

$$\overline{y}\approx\varphi(\overline{x})+\frac{1}{2}\varphi''(\overline{x})D_x \qquad (6.10)$$

式中，$\varphi''(x)$为y对x的二次微商，$D_x$为x的散度。显然，如果$\varphi(x)$是线性函数，则$y=\varphi(x)$。式中等号右边的第二项是函数$\varphi(x)$非线性的修正值。

这样一来，对农业气象计算来说，利用平均资料的可能性决定于，在资料变化范围内，反映农业生态系统的相应函数的线性变化和程度。

上述评价线性化适用性的方法，对于长的时间间隔来说是不能用的，因为函数$\varphi(x)$本身可能变化。

使用合理平均的资料可以简化计算，而且常证明是正确的，但不能忘记与非线性有关而且可能出现的误差。不过，在实践中也有这样的情形，由于作物反应强烈的非线性性，在分析时引用实时资料是必要的（评价霜冻、高温的影响等等）。

（五）系统的适应性

系统的重要特性是行为的适应性。现代生物学把生物有机体看成一个开放的自动调节和自我建设的动态系统。对正在变化的情况具有适应性，只有生物才具备这种特性。个体发育过程中，起作用的调节原则有二：（1）按遗传因子即发育的内部因子进行发育；（2）发育与外界环境的状况相适应，即以外界因子为转移。

生物量积累过程的自动调节包括各种水平的植物组织。在细

胞水平上，是代谢过程的基本点的移动；在个别器官水平上，是其外形的变化；在机体的水平上，是代谢产物处于最低值的有机体部分，其重量相对增加。调节生物量积累速度的基本属性是，将可塑性物质分配（甚至再分配）到处于最困难条件下的那个器官，以改善其供应的能力。例如，在无机营养元素亏缺的情况下，根系的解剖—形态变化是引起活动表面的延长和增大；水分亏缺还促使最适于用水的根系的形成。

没有信息的控制和传递过程，自动调节和适应性是不可能的。因而，反应环境条件对作物有机体行为影响的模式，应当反映信息接收、改造和使用的过程。除此而外，模式还带有控制的性质。

建立这类模式的关键是利用最佳化原则或者变异的原则。按P.罗森（P.Розен）的说法，最佳化原则系指：在自然选择方面具有最佳的生物学结构的有机体。另外，它能把由周围环境的基本特性所决定的某种估价函数减小到最低限度。这一自然的假设称为最佳结构原则。这一原则可以解决一系列生物学课题。在可以进行直接检验的许多情况下，以最佳化原则为基础所做出的理论鉴定，与直接的生物学观测资料十分吻合。然而，在一般情况下，确定适当的估价函数绝不是轻而易举的，其实，运用这一原则的主要困难和艺术正在于此。

根据光合生产力的理论，托明（Tooming）提出了一个群体在营养生长期间总是最大限度地扩大自身生产力($CO_2$气体交换)的假说。

我们的任务不是详细地分析农业群落适应性反应的各种表现。只需指出的是，在不久的将来，对适应机理的注意将成为完善气象系统数学模式的基本方向。再举一个论据来说明进行模拟时运用最佳原则的必要性。系统理论的前提之一是，确认有这样一类情况，只有通过对目的性的描述，才能得出一个系统的有效（模式）结构。对于复杂系统特别是生物学系统来说，以目的性为根据的处理方法是唯一有可能得到（模式）结构的处理方法。于

是，可以得出结论，必须建立有目的的适应性行为模式，除了别的因素而外，还有形式方面的考虑。

## 四、农业气象模式的建立

### （一）建立模式的步骤

（1）明确建立模式的目的和要解决的问题。搞清楚要解决问题的实质是什么？在许多有关问题中应该首先处理哪一个问题。

（2）收集和整理有关资料和数据，由此对系统本身的属性进行深入的了解。应注意收集的材料和数据是否满足解决问题的需要，分析资料的取样误差和实验误差，如误差不确定，则用其算术平均数。

（3）形成概念模式。在收集各方面情况的基础上，设想出所要建立的模式形式，设计出解决问题的方法，这时必须注意到建立模式的过程，要遵循哪些基本原理和原则。

此时要抓主要问题以及它们的彼此之间的数量关系，推测其可能存在的函数关系。

（4）以设想的函数为基础，建立具体的模式。

（5）形成一个合乎逻辑的计算方法，最好是逐步的计算方法，为编程序做好准备。

（6）核对算法。检查算法，确认算法无误。

（7）以适合的语言编制模式程序。

（8）由最有效的资料或关系密切的资料（系统资料，不是片断资料）估算必要的参数。

（9）调试程序，确认无误，并在量纲上或逻辑上没有矛盾。

（10）检验模式对各种参数和因素的敏感性，特别注意那些不肯定的、高度变化的或者在自然界要加以控制的参数和因素，因为我们所建立的模式要具有一定的稳定性，就必须要求模式对参数的变化不能过于敏感。

（11）设计并进行模式实验，检查其结果。若有缺点或要增

加新的运动和预测功能时，修改或重新建立模式。

(12) 分析实验数据，并与在自然界特别的数据进行对比分析，验证模式。确定：①是否每个工作细节无误；②原假定是否合理；③根据一般的经验，结果有无反常现象；

若模式不符合实际，就要提出如下问题：①是否没有考虑某主要因素；②是否包含了某个干扰因素以致混淆了结果；③是否建立函数关系时有错误；④是否估算参数时有错误。

(13) 用模式解决实际问题。上述是主要步骤，实际上没有明显界限，原则是合理的就用，不合理就改，直到满意为止。但总的来说，有两种处理方法，一是从子系统的细节模拟开始，然后注意它们之间的相互作用，逐步形成一个全面的模式；另一种是从整个系统的总体模式出发，然后在子系统中处理细节。事实上，在实践中必须采用这两种方法对待模式的不同部位，即交错进行直到模拟的细节和整体概括都合乎要求为止。

(二) 建立模式应考虑的因素

建立模式应考虑如下因素：

(1) 输入变量，它与系统内部状态无关。它们代表作用于系统的外因。它能引起内部变化，这些因素称为作用函数，可以是可控制的，也可以是不可控制的。如太阳辐射难以控制，灌溉量可以控制等。

(2) 输出变量，这是输入变量对系统状态变量的作用而产生的，如作物群体的产量等。

(3) 状态变量，这是表示系统状态特征的变量，它能直接引起输出变量变化，确定其变化过程，比如土壤含水量多少可确定土壤热和水的传导性，状态变量在某种意义上是输入变量最终影响输出变量的中间变量。

(4) 比率变量，它是控制系统状态中，由各种变量变化所引起的各种反应的比率，比率变量常称为参数，它是控制方程中的系数，或是描述输出变量函数的相关性而定的系数，比率变量（参

数）可用如下方法取得：（1）由观测值直接取得。（2）通过经验方程，应用最小二乘法估算。（3）使用类似于最优化的方法，调整模式的输出，使理论值和观测值的差异达最小，而确定系数。

比如说辐射是输入变量，土温是状态变量，土壤热流量就是输出变量，而土壤热传导系数就是参数，对土壤湿度变化而言的另一个输出变量是土壤表面的热扩散，其比率变量（参数）是热扩散率。各种变量的划分是相对的，随研究目的不同而异。

（三）农作物生长动态模式

为了对作物生长动态模式的建立有一个了解，先简要表明一组表达系统关联和部件的图示。

如图6.4和6.5所示，物质A系由生长速率GR所控制，而GR又被相对生长率RGR所提供和从物质A现有数量而来的信息流所控制，组成作物指数生长动态。如果GR再受到作物输送物质能力CC而来的信息流所控制，则形成阻滞生长动态。

戴·维特（de wit）等使用上述分析方法，设计了刻划作物根、茎、叶生长之间所存在的复杂函数关系，建立它们之间相互

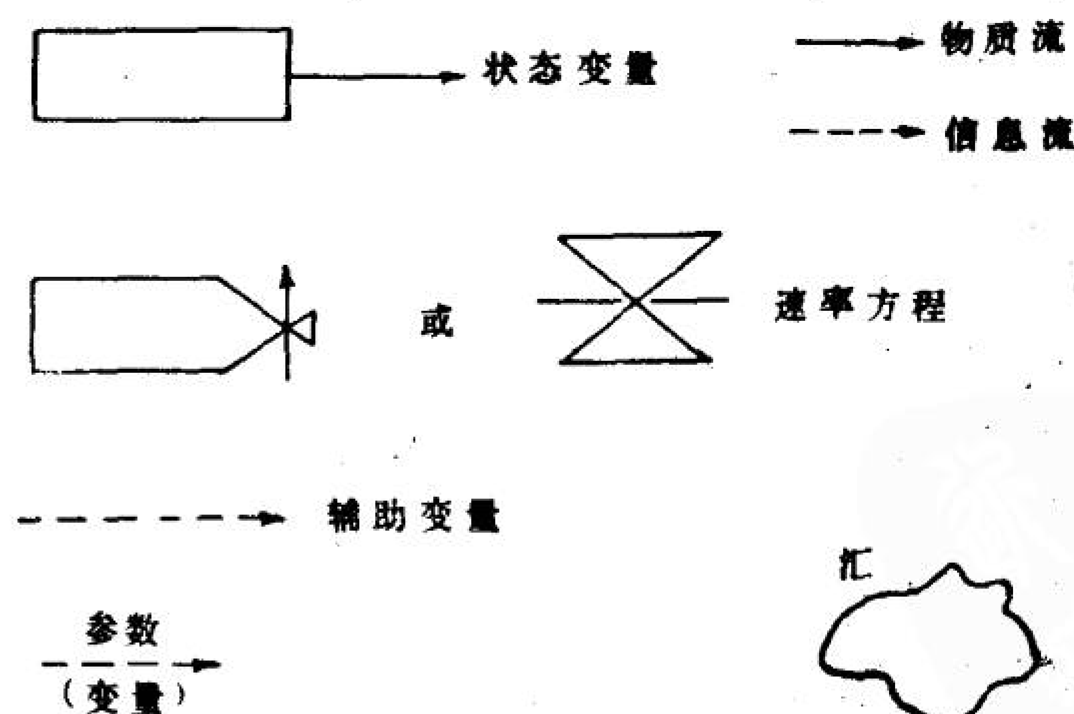



图6.4 动态模式符号的识别

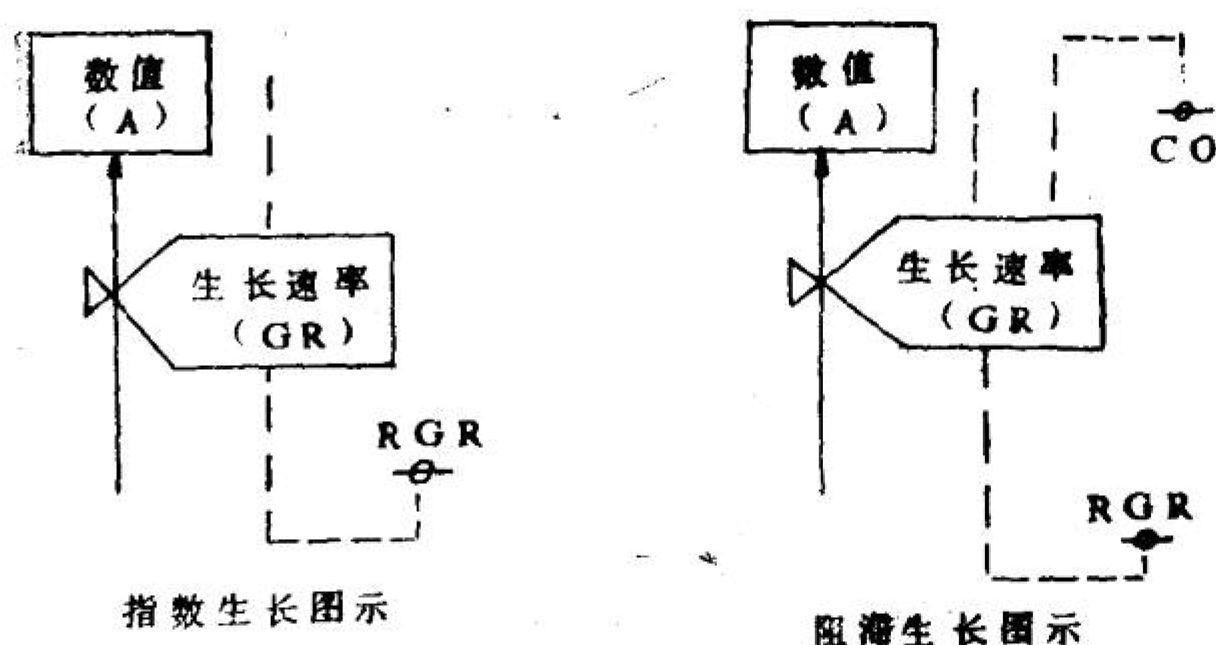



图6.5 农作物生长动态模式图示

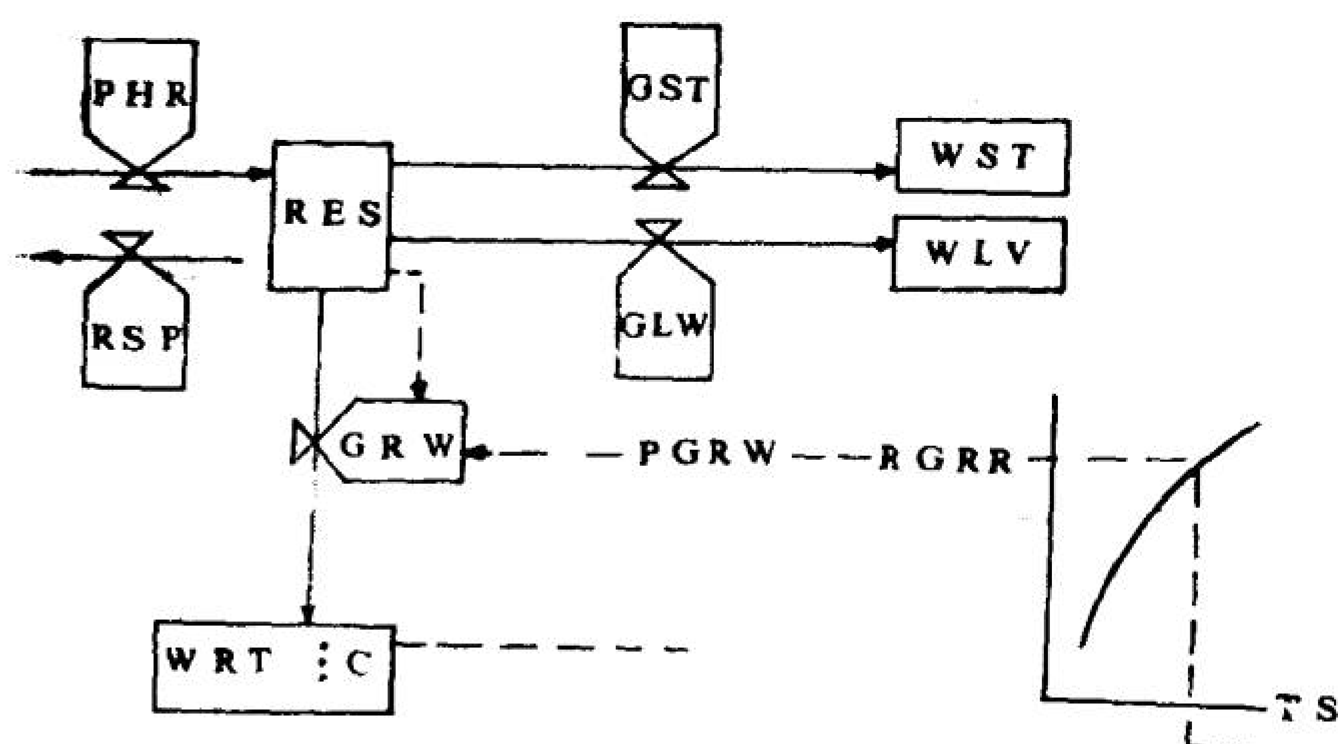



图6.6 作物生长模式中心部分示意图

联系、相互平衡的模式（图6.6）。

图6.6假定任何作物都包含着一个物质贮藏量（RES），光合作用速率（PHR）是控制着该库收入的因子，而呼吸消耗则由呼吸作用速率（RSP）控制，用于长根的消耗被根重生长速率（GRW）所控制；茎增长、叶增长分别由茎重生长速率（GST）和叶重生长速率（GLW）所控。图中WRT，WST和WLV分别代表根重、茎重和叶重。RGRR代表根的相对生长率，PGRW代表根重的可增长率；C代表根的生长能力；TS代表土壤温度。很清楚，

土壤温度控制着根的相对生长率，根相对生长率和作物根的生长能力的信息流，又控制着根的可能增长率；根的可能增长率和物质贮藏库同时对 GRW 施加影响。由此组成一个复杂的多途径反馈的作物生长模式。

在作物生长的模式内，常使用各种等级的子模式，也就是说把更基本的过程经过各个相分离的子模式而综合在一起，这些子模式诸如呼吸作用模式。小气候要素的作用模式，最后综合分析响应，得到该基本过程的描述。

(四) 土壤—植物—大气模式 (SPAM)

这是肖科洛弗特 (Shawcroft) 等人研究的模式图示。

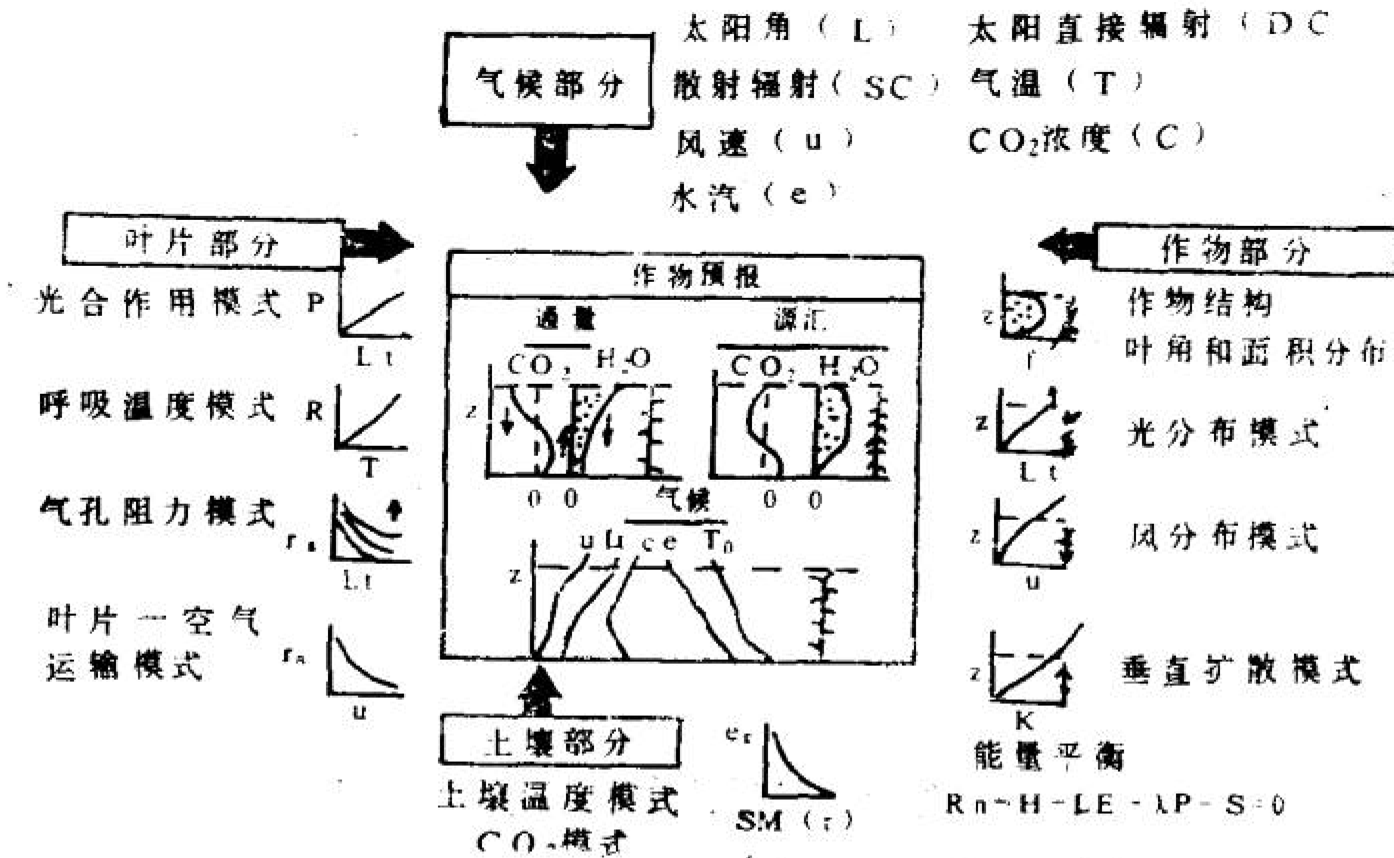



图6.7 模式的基本分量和预报

〔图中SPAM所需要的输入，亚模式和表示白天气候$CO_2$，$H_2O$（水汽）预报的图解 高度(Z)，风(U)，光(LT)，$CO_2$浓度(C)，水汽(e)，气温($T_0$)，表面水汽压($e_s$)，表面土壤湿度或水分含量SM(τ)，光合作用(P)，呼吸作用(R)，叶温(T)，气孔阻力($r_s$)，最大光强下最小气孔阻力(r)，气体扩散阻力($r_a$)，叶片表面积(f)，垂直扩散系数(K)，净辐射($R_n$)，显热(H)，潜热(LE)，光化学能当量(P)，土壤热容量(S)〕。

(1) 模式的逻辑关系及其预报　　逻辑关系是①定义叶片和土壤表面对所给小气候条件的反应；②从整体的气象边界条件计算叶片和土壤表面的贴近微气候；③计算叶片和土壤表面对此贴近微气候的特别反应；④总结从土壤表面到作物顶部的反应，逐层地取得整个作物的反应。模式的基本分量和预报见图6.7。模式的逻辑关系见流线图（图6.8）。

在图6.7方框下面部分表明，根据定义的作物反应特征和大气候条件以计算作物群体中微气候，它们表示为风、光或辐射、$CO_2$、水汽和温度的剖面，用以确定作物覆盖层中这些分量变化的浓度和强度。实际上这些剖面确定作物覆盖中任一个水平叶片表面的气候。这里时间尺度是重要的，它表示剖面是平稳状态，按小时顺序的平均值。这里引用的是玉米地中午的一个典型例子，正如逻辑关系流线图（图6.8）所示。

从已计算的微气候条件和植物反应来预报作物的活动，作物植被任一平面上源或汇的强度或与任一平面相交的垂直通量或流量密度的预报，由图6.7的方框上部表示。$CO_2$和水汽的通量密度及源和汇强度已被表明，上述的辐射、潜热、显热和光化学能量强度以及动量亦可用这样的方法描述。水汽通量密度表示为单位时间、单位面积从土壤表面到作物顶部的稳定增长，$CO_2$通量由大气向活跃的有光合能力的叶片，是向下的，从呼吸的土壤到下层叶片是向上的。水汽源的真正强度表明植被中最强蒸腾的位置。同样，负的汇入点的强度表示$CO_2$的最强的吸收，源和汇的强度为以小时为单位的单位体积强度的平均稳定状态值。

其他实体亦可同理预报，某些可试验的因子是叶面积系数，叶角分布，叶子对光合反应，气孔反应和压力变化，土壤—植物—大气模式也应当认为是预报生长或产量的模式用以试验某些因子灵敏度的工具。

(2) 模式预测结果与实验数据　　模式预测结果与实验数据之间有着密切的关系。这种关系可以用图6.9示意。

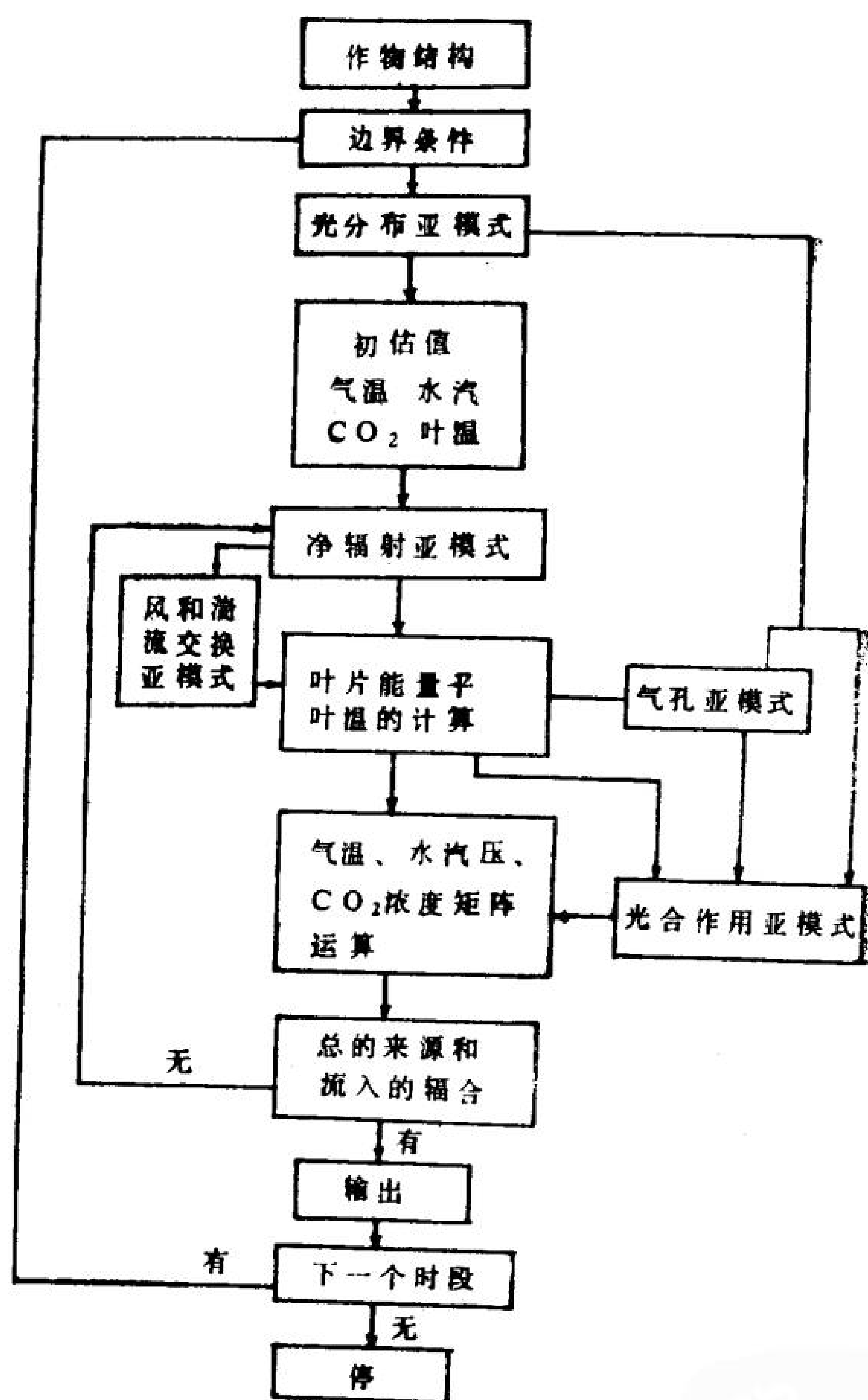



图6.8 模式的逻辑关系

图6.9中是表示它们相互联系的一种方式。不需要详加解释，在理论模式和经验模型的建立过程中有一些是共同的。在建立模式时，我们是受到现有的有关数据和目前对问题理解所指导，在检

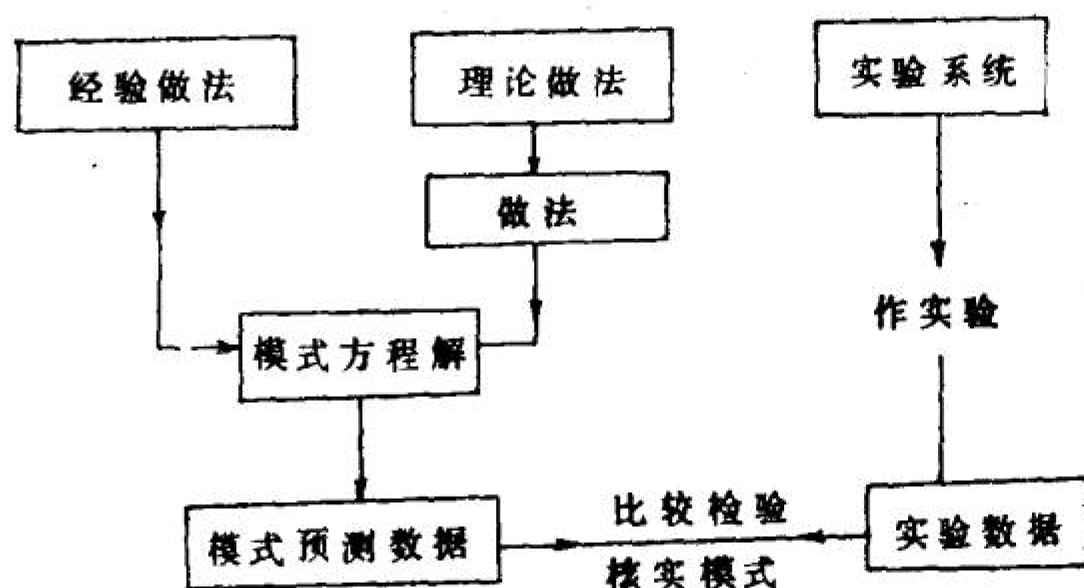


图6.9　模式数据与实验数据

验模式时可以利用特地收集起来的实验数据。但是，模式能否成立和价值如何，几乎完全取决于假设的合理程度。

## §3　作物气象模式

作物气象模式一般划分为三类，即经验统计模式、理论统计模式和理论模式。

### 一、经验统计模式

早在农业气象学研究之始，统计学方法即在实际应用中得到重视，苏联Y·M·奥布霍夫（обухов）和美国R·费希尔（Fisher）的工作具有奠基的性质。奥布霍夫首先广泛地应用多元回归法分析气象条件对作物产量的影响，其线性回归模式如下：

$$\hat{Y}=a+\sum_{i=1}^{n}B_i\cdot X_i \qquad (6.11)$$

式中，$\hat{Y}$为估测产量，a为常数项，$B_i$(i=1到n）为系数，$X_i$为n个影响产量的因子。这些因子包括气象因子，作物的某些生育状况，如高度、密度、叶面积等以及农业技术措施。

R·费希尔提出积分回归方法用以研究气象条件对小麦产量的影响。多元积分回归的模式为

$$\hat{y} = C + \sum_{j=1}^{p} \int_0^{\tau} a_j(t) X_j(t) dt \qquad (6.12)$$

(6.12) 式反映了多个气象要素$X_j (j=1,2,\cdots\cdots p)$在不同发育时段对产量Y的影响，$X_j(t)$为第j个气象要素在t时刻的取值，$a_j(t)$为$X_j(t)$对 Y 影响的系数，它实质上是积分回归的偏回归系数。根据$a_j(t)$随时间的变化，可以分析出不同发育时段第j个气象要素对Y的影响程度，$a_j(t)$时间变化曲线上的峰谷的分布实际对应了作物对第j个气象要素的敏感期。

此外，苏联康斯坦丁诺夫（Константинов）在研究冬小麦产量问题时，提出一种图解曲线回归模式，即统计学上的"残差法"，也是一种经验统计模式。图6.10即为其图解实例。

图6.10中表明，冬小麦产量形成受到作物生物学特性（生物组）、天气因子（气象组）、土壤肥力（肥力组）和农业技术（农业技术组）等四方面组合因素的综合影响。用这种方法分析可以分为不同发育时期进行，最后可以综合成最终产量和其所研究的影响因子的关系。据作者研究，它们对产生的影响是等价的（图6.10）下例为据图6.10中相对产量的计算结果。

$$\Delta y_{QW_1} = y_{实} - y_{rQW_1} \qquad (6.13)$$

这里$y_{rQW_1}$是相对产量取自曲线（图6.11）中数值。

$\Delta y_{QW_1}$，这是受到其他尚未考虑的因子的影响而造成的产量差值，即$y_{rQW_1}$与$y_{实}$之间差值。

把$\Delta y_{QW_1}$换算成相对产量，则

$$y_{QW_2} = \Delta y_{QW_1} + 1 \qquad (6.14)$$

同理

$$y_{QW_3} = \Delta y_{QW_2} + 1 \qquad (6.15)$$

$$y_{QW_4} = \Delta y_{QW_3} + 1 \qquad (6.16)$$

当顺序计算各发育时期的土壤水分影响时，计算的产量可由关系式求得

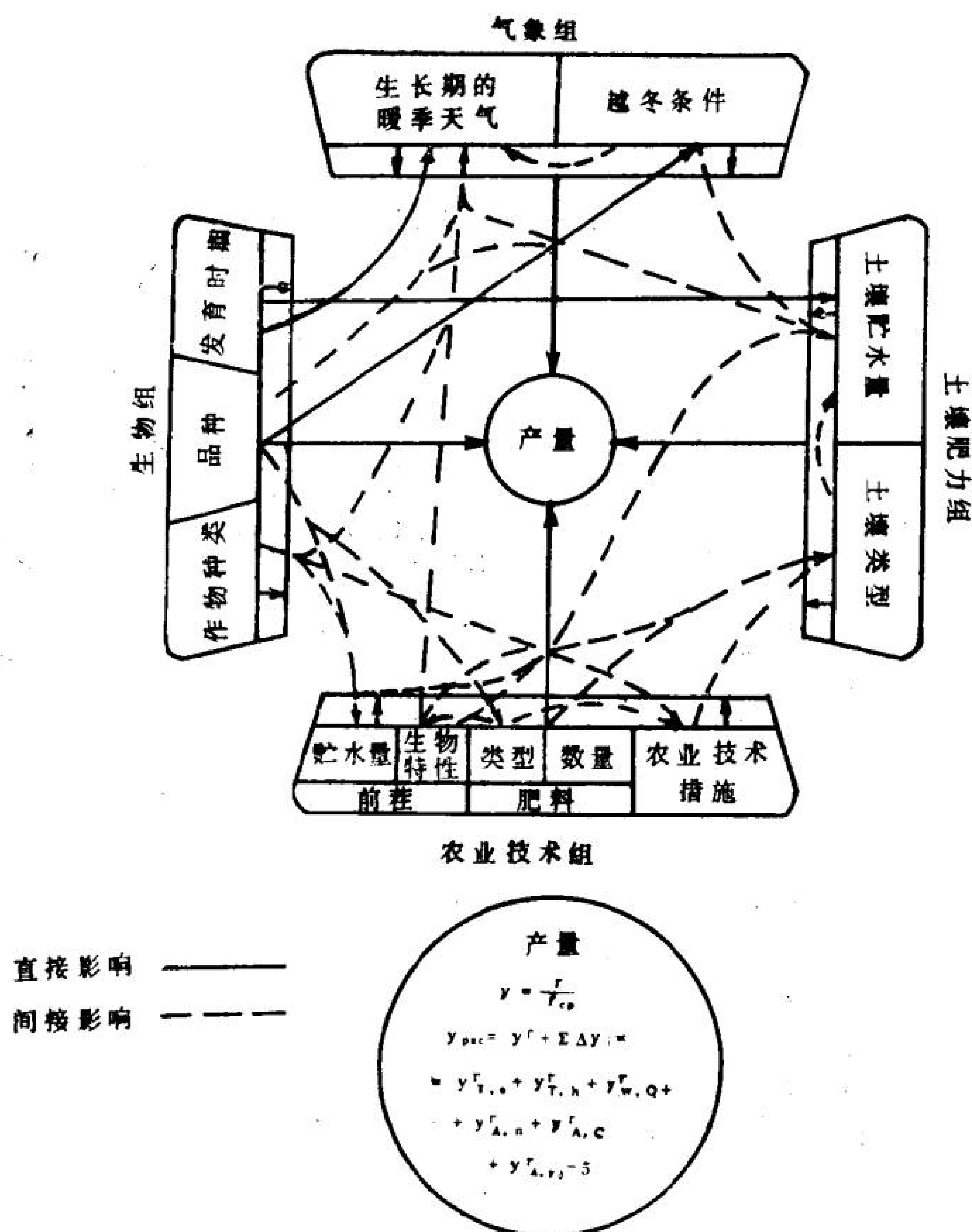



图6.10　冬小麦产量与确定性因子关系的模式图

图注:

$Y$ ——产量;

$Y_{cp}$—— 原始样本的平均产量;

$y$ ——相对产量;

$y_{psc}$—— 按顺序地考虑各影响因子后的计算产量;

$y^{\Gamma}_{i}$—— 受第i个因子影响的相对产量的图解值;

$\Sigma\Delta y^{\Gamma}_{i}$ ——受第i个因子影响的相对产量与实产量较差和;

$y^{\Gamma}_{T,e}$ ——受暖天气条件影响的产量的图解值;

$y^{\Gamma}_{z,h}$ ——受越冬条件影响的产量的图解值;

$y^{\Gamma}_{w,Q}$ ——受土壤肥力影响的产量的图解值;

$y^{\Gamma}_{A,n}$ ——受前茬影响的产量的图解值;

$y^{\Gamma}_{A,c}$ ——受品种影响的产量的图解值;

$y^{\Gamma}_{A,y\theta}$—— 受肥料影响的产量的图解值。

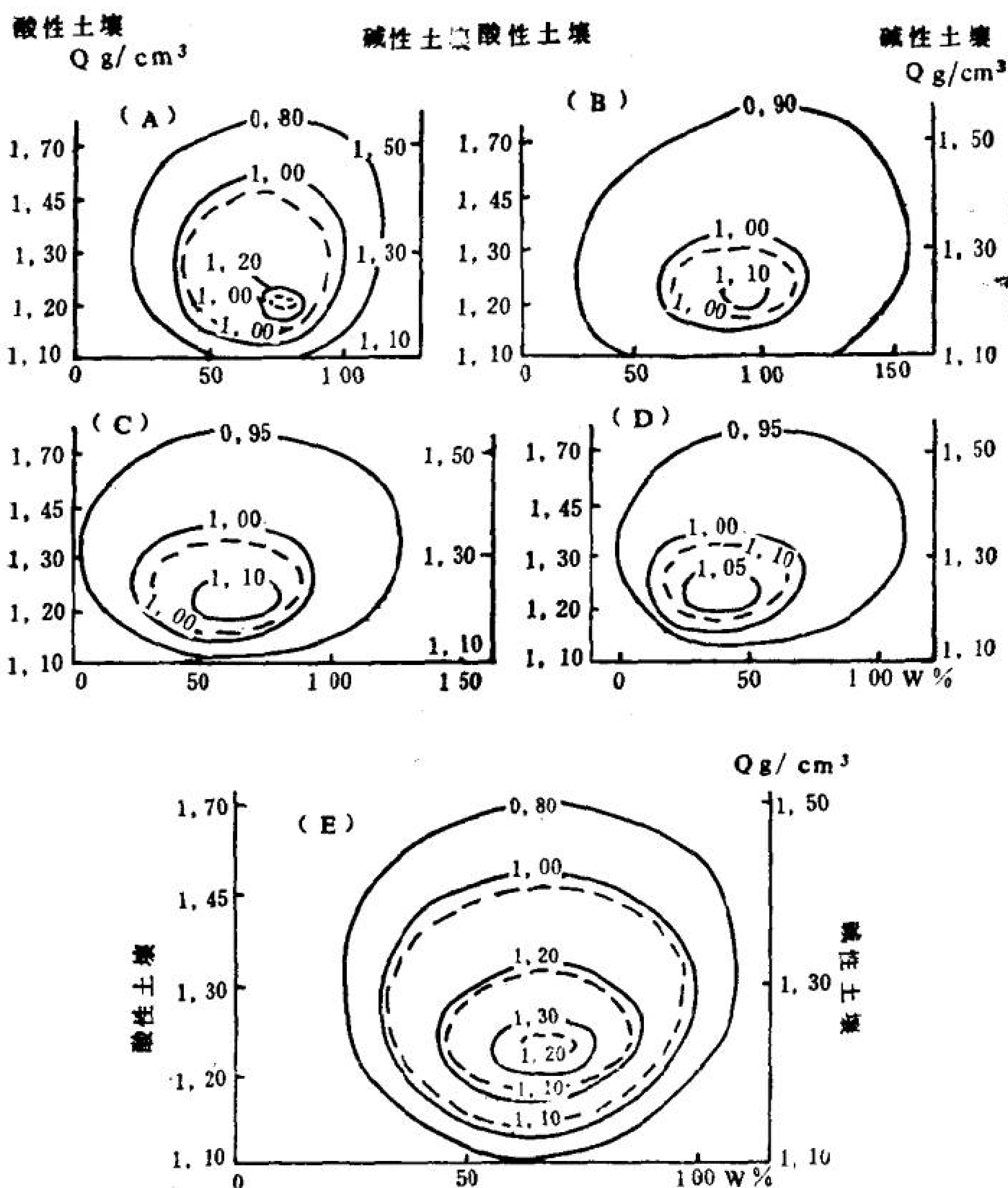



图6.11 产量与用土壤有效含水量W（占田间最小持水量的%）和土壤容重（Q克/厘米³）表示的土壤肥力的关系（考虑了土壤酸度）

A：播种一停止生长；B：返青一拔节；C：拔节一抽穗；D：抽穗一成熟；E：整个生长期。

（实线为具体年份的数值；虚线为多年平均值）

$$y_{QW} = y_{\Gamma QW1} + \sum_{i=2}^{i=4} \Delta y_{QWi} = y^{\Gamma}_{Q,W,1} + y^{\Gamma}_{Q,W,2} + y^{\Gamma}_{Q,W,3} \pm y^{\Gamma}_{Q,W,4} - 3 \quad (6.17)$$

由方程计算的生长暖季土壤肥力条件和相对产量的曲线关系列于图6.11E。同理可以研究天气条件、农业技术、作物特性对农作物产量的影响。例如在分析天气条件对产量的影响时，在图解中所用的产量数值，已除去了天气条件的影响

$$y_{T,e1}=\Delta y_{Te1}+1 \tag{6.18}$$

分析方法以及其他各组的分析以此类推，计算公式列于图6.10。

根据冬小麦实例计算，在冬小麦产量形成主要因子中，只考虑生长期内天气条件，其r＝0.471；考虑各生育时期的土壤肥力则r＝0.678；再加入越冬条件后，r＝0.762；最后计算农业技术水平，则r＝0.877。整个分析过程中，相关关系的紧密程度不断增加，证明分析方法的理论依据和选择的因子是正确的。

## 二、理论统计模式

为了克服经验统计模式的缺点，从七十年代以来，许多学者提出一些新的模式。这类模式的特点是在回归统计模式中更充分地考虑到影响作物生育和产量形成的物理和生理上的机理。实质上形成了半理论、半经验模式。

贝尔的作物产量形成的阶乘模式就是一例。具体阐述如下：

### （一）资料

用在作物—天气分析模式中的气候、物候和作物产量资料是从特有的作物—天气关系方面设计于1953—1962年在加拿大农业部所属八个研究点取得。这些点无论是气候条件，还是土壤条件，变化都比较大。试验技术和资料的观测按统一的标准进行。天气观测按加拿大气象服务系统标准，它和世界气象组织的规定完全一致。其初始输入变量的平均、极值（最高与最低气温）以及两个导变量〔AE/PE和SM(含义见后)〕分别用于所选定的5个发育时期。此外，峰态和偏态统计表明，用于模式中的资料为正态分布。

小麦群体产量从三个重复小区上取得。小区面积6.5×2.7米（共18行，行距0.15米）（原始资料见表6.1、表6.2）。

很重要的一点是，所用资料是从加拿大8个点和10个生产季节78个播栽期中取得的。播种材料、栽培措施等尽量使其一致，但作物仍生长在各种气候和季节的天气类型下。这种用标准的回归分析得到的以求具有重要生物学意义的数学关系往往是困

**表6.1 用于模式分析的原始资料（一）**

| 变量 | 发育期符号 | 时段 | 最高 | 最低 | 平均 | SD | 偏态 | 峰态 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Max | P—E | 0—1 | 33.3 | 0.0 | 18.1 | 6.2 | −0.2 | −0.5 |
| | E—J | 1—2 | 34.4 | 3.3 | 20.0 | 5.3 | −0.2 | −0.2 |
| | J—H | 2—3 | 35.6 | 6.7 | 22.8 | 4.7 | −0.1 | −0.1 |
| | H—S | 3—4 | 35.6 | 8.3 | 23.6 | 4.7 | −0.2 | −0.3 |
| | S—R | 4—5 | 37.2 | 3.3 | 21.8 | 5.8 | −0.3 | −0.1 |
| | P—R | 0—5 | 37.2 | 0.0 | 21.8 | 5.5 | −0.4 | 0.1 |
| Min | P—E | 0—1 | 21.1 | −9.4 | 4.9 | 4.5 | 0.4 | 0.3 |
| | E—J | 1—2 | 21.7 | −5.0 | 7.6 | 4.4 | 0.2 | −0.1 |
| | J—H | 2—3 | 22.2 | −2.2 | 10.1 | 4.1 | 0.3 | −0.1 |
| | H—S | 3—4 | 24.4 | −0.6 | 11.1 | 4.1 | 0.2 | −0.2 |
| | S—R | 4—5 | 22.8 | −6.1 | 9.0 | 5.1 | 0.1 | −0.3 |
| | P—R | 0—5 | 24.4 | −9.4 | 9.2 | 4.8 | 0.0 | −0.1 |
| AE/PE | P—E | 0—1 | 2.00 | 0.00 | 0.34 | 0.32 | 0.8 | 0.3 |
| | E—J | 1—2 | 1.22 | 0.00 | 0.48 | 0.34 | 0.1 | −0.1 |
| | J—H | 2—3 | 1.67 | 0.00 | 0.72 | 0.27 | −0.5 | −0.1 |
| | H—S | 3—4 | 2.00 | 0.00 | 0.87 | 0.33 | −0.5 | −0.2 |
| | S—R | 4—5 | | 0.00 | 0.63 | 0.34 | −0.3 | −0.3 |
| | P—R | 0—5 | 2.00 | 0.00 | 0.67 | 0.35 | −0.2 | −0.1 |
| SM | P—E | 0—1 | 1.00 | 0.09 | 0.62 | 0.20 | −0.3 | −0.1 |
| | E—J | 1—2 | 1.00 | 0.07 | 0.63 | 0.23 | −0.1 | −0.7 |
| | J—H | 2—3 | 1.00 | 0.28 | 0.78 | 0.16 | −0.8 | −0.2 |
| | H—S | 3—4 | 1.00 | 0.25 | 0.71 | 0.19 | −0.1 | −0.9 |
| | S—R | 4—5 | 1.00 | 0.08 | 0.60 | 0.25 | −0.1 | −0.8 |
| | P—R | 0—5 | 1.00 | 0.07 | 0.68 | 0.21 | −0.4 | −0.5 |

表中SD为标准差，P为播种期，E为出苗期，J为拔节期，H为抽穗期，S为腊熟期，R为收割期。

表6.2 用于模式分析的原始资料(二)

| 站 点 | 诺曼丁 | 渥太华 | 哈 罗 | 斯威夫特卡伦特 | 拉森姆 | 比佛洛基 | 佛夫利昂堡 | 辛普生堡 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| (北纬) | 48°51′ | 45°02′ | 42°02′ | 52°28′ | 55°11′ | 58°23′ | 58°23′ | 61°52′ |
| (西经) | 73°32′ | 82°53′ | 107°45′ | 113°45′ | 119°22′ | 116°03′ | 116°03′ | 125°21′ |
| 土壤类型 | 粉砂壤土 | 壤 土 | 砂壤土 | 粘壤土 | 粘壤土 | 粘壤土 | 砂壤土 | 粉砂壤土 |
| 播种次数 | 9 | 17 | 7 | 9 | 9 | 10 | 9 | 8 |
| 平均播期 (P) | 30/5 | 25/5 | 19/4 | 20/5 | 20/5 | 10/5 | 19/5 | 22/5 |
| 出苗 (E) | 8/6 | 31/5 | 29/4 | 31/5 | 31/5 | 22/5 | 29/5 | 1/6 |
| 拔节 (J) | 29/6 | 21/6 | 31/5 | 15/6 | 15/6 | 12/6 | 19/6 | 16/6 |
| 抽穗 (H) | 21/7 | 13/7 | 15/6 | 17/7 | 17/7 | 3/7 | 4/7 | 9/7 |
| 腊熟 (S) | 23/8 | 3/8 | 15/7 | 20/8 | 20/8 | 10/8 | 9/8 | 2/8 |
| 收割 (R) | 15/9 | 15/8 | 26/7 | 8/9 | 8/9 | 1/9 | 29/8 | 25/8 |
| 时段平均(P—E) | 9 | 6 | 10 | 11 | 11 | 12 | 10 | 10 |
| (E—J) | 21 | 22 | 32 | 15 | 15 | 21 | 21 | 15 |
| (J—H) | 22 | 22 | 15 | 32 | 32 | 21 | 15 | 23 |
| (H—S) | 23 | 21 | 30 | 34 | 34 | 38 | 36 | 24 |
| (S—R) | 23 | 12 | 11 | 19 | 19 | 22 | 20 | 23 |
| 平均产量(公斤/公顷) | 2669 | 1578 | 1764 | 2288 | 2288 | 2696 | 2720 | 2837 |

难的。

为了便于了解各个符号的含义，有关综合变量的定义如下：

Min：第 i 天早晨观测的前一夜最低气温（℃）。

Max：第 i + 1天早晨观测的前一天的最高气温（℃）。

SM：作物根层中有关植物有效的土壤湿度（土壤中总的有效土壤湿度和同层饱和土壤湿度含量之比）。SM 的变化范围由 0（土壤湿度无效）到 1。

AE/PE：第 i 天实际蒸散（AE）和潜在蒸散（PE）之比。变化范围从 0 到 1。

$Q_S$：从大气层顶部总能量（$Q_0$）、每天实际日照时数和可照时数（N）计算的入射总辐射。

$$Q_S = Q_0[a + b(n/N)] \tag{6.19}$$

（二）模式设计

设计的作物—天气分析模式主要分析每日任三个变量对作物反应的影响。这表现在作物的季节产量或产量结构上，作物对三个变量中任一个的反应或是直线的（正的或负的）或是二次曲线（上凹或下凹）的。这种反应在作物的整个生活周期中定量地变化着。这是生物气象时间的函数。反应的特点不知道，也不可能事先确定。这样，假定反应在整个季节中逐渐变化，而且每个变量的每天权重，作为生物气象时间的函数，用一个四阶多项式足以符合要求。

关于模式中所用函数关系的确定，基于作物产量基本上依赖于三个农业气象变量的假定：能量，温度和土壤湿度（或蒸散）。这三个变量可以相互改变，但在其生活周期中任一天都对其最终产量有正或负的影响，因此，作物—天气分析模式的基本方程为

$$y = \sum_{i=0}^{m} V_1 \times V_2 \times V_3 \tag{6.20}$$

这里 y 为“依变量”，是作物产量或某时刻之末的产量结构，本例中为每公顷公斤数的种子产量。

$\sum_{t=0}^{m}$ 从生物气象时间$t=0$到$t=m$每日V值的总和$V_1$、$V_2$、$V_3$为所选自变量的函数。每个V函数的一般形式

$$V=(u_1t+u_2t^2+u_3t^3+u_4t^4)+(u_5t+u_6t^2+u_7t^3+u_8t^4)X+(u_9t+u_{10}t^2+u_{11}t^3+u_{12}t^4)X^2 \quad (6.21)$$

式中$u_1 \cdots\cdots u_{12}$是系数，它们是用逐步回归分析法确定每个V的估算值，$V_1$、$V_2$或$V_3$中X代表如资料中所定义的任一个变量。这三个变量中任一个负的贡献被认为是真实的并用于每天产量贡献的计算中（这是和罗伯逊模式的差别所在，他认为只有正的贡献）。所以，在作物生产过程中，由于生长条件不好，在季节内任何一天都有可能使前期累积的潜在产量降低，它反应在任一个、二个、三个所选的自变量中。

关于系数的估值，用电子计算机运算和核对，经过多次迭代一直继续到确定的系数（CD)在其最高值变为稳定或估值的标准差（SEE）在最低值变为稳定。计算机运算的迭代次数由运算控制决定。据计算，回归系数的稳定在40次迭代之后，每次迭代给出回归分析的中间结果。为了校对的目的，编有专门控制程序。

（三）输出实例

常规气候资料的各种组合和导出的农业气象变量曾作不同的计算机运算。表6.3给出所选变量的解系数（CD），从表可见，应取$Q_s$，AE/PE，和Min一组第40次以后的迭代结果，但是，辐射包含在作物—天气分析模式中不如用最高温度好，因为每日的太阳辐射资料不象最高和最低温度那样容易取得。

表6.3给出Max，Min，AE/PE—组在45次迭代后的相关和回归统计。图6.12给出1∶1回归直线，表6.4给出小麦实际产量和估产及其误差，一般说，相对误差在1—11%。但对渥太华三次播期估产高28%。另一方面，辛普生堡低估541公斤/公顷(19%)。因为它地处61°51′N，光周期的补偿作用没有作应有的考虑。罗

伯逊证明，长日照在高次方程模式中起有利作用。它证明在高纬度，作物生产要更好地利用热量和水分条件。

属于这类理论计算模式是很多的，例如：

1. 作物群体的光—光合模式，见本书第二章，第四节公式(2.12) 和 (2.13) 。

2. 水稻空壳率与光、温关系模式

$$P_s = P_0 e^{-as} + b\overline{T} + c \tag{6.22}$$

**表6.3 Max,Min,AE/PE第45次迭代时回归分析**

| | 观测值（Y） | | 估算值 |
|---|---|---|---|
| 平 均 | 2218 | | 2207 |
| 标准差 | 11.38 | | 10.25 |
| 估测误差 | | 540.65 | |
| 样本数 | | 78 | |
| 截 距 | | 62.85 | |
| 斜 率 | | 0.98 | |
| CD（解系数） | | 0.77 | |
| r | | 0.88 | |

**表6.4 小麦产量的观测值和计算值**

| 站 名 | 播 期 | 年 数 | 产量(公斤/公顷) 观 测 值 | 计算值 | 误 差 | 相 对 误 差 (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 渥太华 | 1 | 9 | 2135 | 2059 | −76 | 4 |
| | 2,3,4 | 8 | 951 | 1222 | +271 | 28 |
| | 1,2,3,4 | 17 | 1578 | 1665 | +87 | 6 |
| 诺曼丁 | 1 | 8 | 2669 | 2408 | −261 | 10 |
| 哈 罗 | 1 | 7 | 1764 | 1887 | +123 | 7 |
| 斯威夫特卡伦特 | 1 | 10 | 1776 | 1785 | +0.9 | 1 |
| 拉科姆 | 1 | 9 | 2288 | 2237 | −174 | 7 |
| 比佛洛基 | 1 | 10 | 2696 | 2808 | +112 | 4 |
| 佛米利昂堡 | 1 | 9 | 2720 | 3021 | +301 | 11 |
| 辛普生堡 | 1 | 8 | 2837 | 2296 | −541 | 19 |

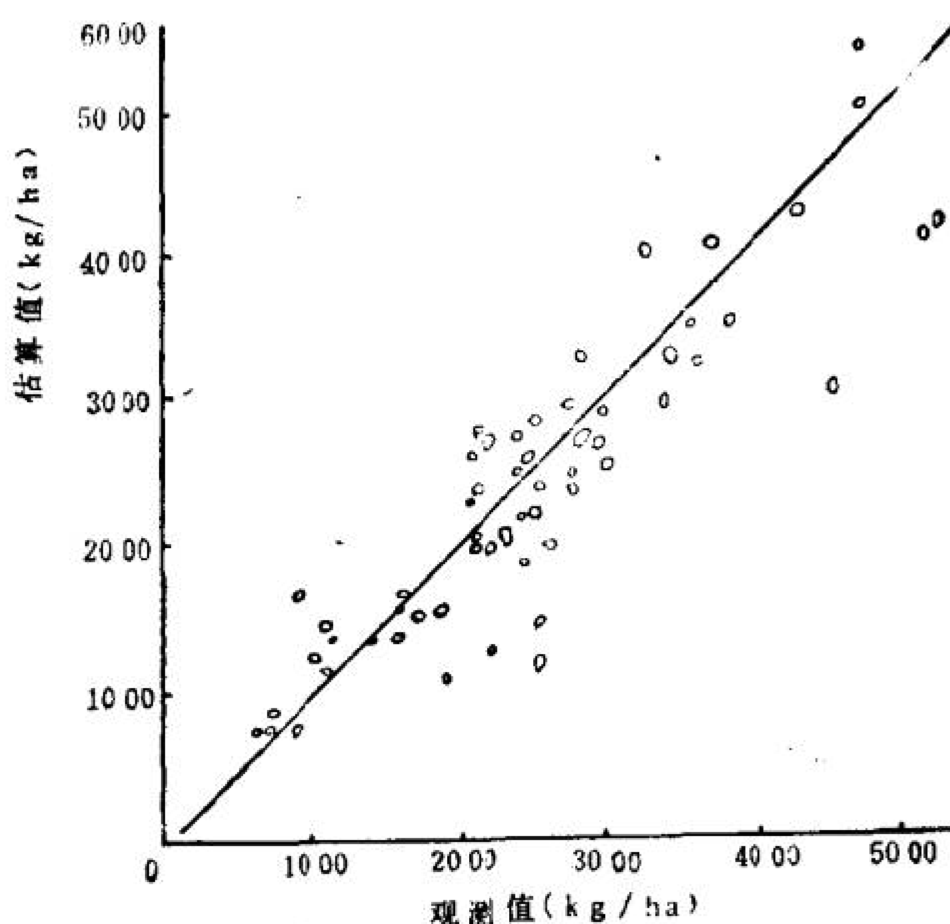



图6.12　产量观测值与估算值1:1回归线散布图

式中：s为处理期间每天实际平均日照时数，$P_s$为在s小时日照条件下的空壳率，t为处理期间的平均温度，$P_0$为完全遮光下的最大空壳率，a、b、c为统计参数。

3． 冬小麦越冬死苗率（y）与临界低温持续时间（t）的关系

$$y = A_0 + ce^{kt} \quad (6.23)$$

式中：$A_0$为临界低温下的死苗率，c、k为统计参数。

**三、理论模式**

理论模式主要依据物理学和生物学规律，模拟作物最重要的生命过程如光合作用、呼吸作用、水分消耗和营养物质运输、分配等，由此而决定作物生产系统的生产力水平。概括地说，就是模拟作物群体的能量和物质转化过程。这类模式显然错综复杂，这类模式已有О.Л.谢罗建科（Сиротенко）研究的土壤—植物—大气系统中交换过程模式，罗斯（Ross）研究的作物光合生产模式以及夏清梭研究的模式等。虽然成果累累，但都处于探

索阶段，距离在生产实际中应用还较远。特别这类模式中许多问题当前尚无法解决，因此这类模式的研究进展缓慢。随着科学技术的发展，作物气象理论模式的研究相信会有重大突破。

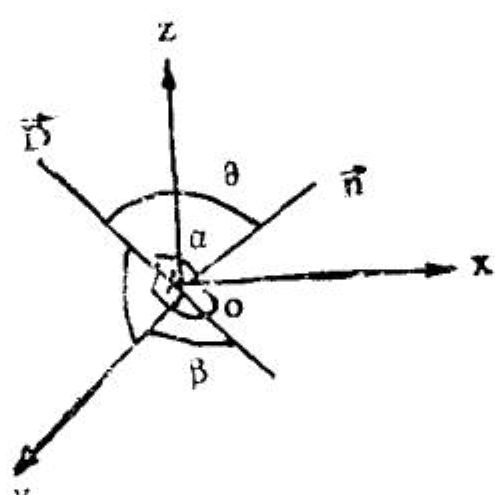


图6.13 作物群体光合模型坐标系图

以下我们引用《粮食作物与气象》中理论模式一例，以窥一斑。

理论模式的建立首先要模拟作物生长状态。这里所阐述的内容为日本黑岩澄雄等提出的作物群体光合量模式。

假设群体纯由叶片所组成，全部叶片法线均与垂线成相同角$\alpha$，绕垂线成随机分布，并且群体叶片面积与分布密度仅是垂直深度的函数，由此可作一直角坐标系(图6.13)。其中，z轴垂直于地面，也是叶片角度分布的对称轴。日光由（y，z）平面射向叶片的o点，太阳高度为h，叶片法线$\overrightarrow{n}$的方向可由$\alpha$（法线方向与垂线的夹角）。$\beta$（太阳方位角）表示，令$\overrightarrow{D}$代表由o指向太阳方向的单位矢量，则$\overrightarrow{n}$、$\overrightarrow{D}$两个矢量的夹角为$\theta$，并且

$$\cos\theta=\cos\alpha\sin h+\sin\alpha\cos h\cos\beta \tag{6.24}$$

由此可以计算出单位面积（1米$^2$）上的最大受光叶面积S′

$$S'=\begin{cases}\dfrac{1}{\cos\alpha} & 当h\geqslant\alpha\\[2ex] \dfrac{\pi\operatorname{tg}h}{2\sin\alpha[\eta(\overline{\beta})+\frac{\pi}{2}\cos\beta]} & 当h<\alpha\end{cases} \tag{6.25}$$

式中，$\eta$函数定义为

$$\eta(\beta)=\sin\beta-\beta\cos\beta \tag{6.26}$$

$\overline{\beta}$是$\cos\theta=0$时的$\beta$角，其值为

$$\overline{\beta}=\cos^{-1}\left(-\frac{\mathrm{tgh}}{\mathrm{tg}\alpha}\right) \qquad (6.27)$$

根据上述模式，可导出群体透光率（T）的普遍公式：

$$T=\exp\left[-\frac{\overline{|\cos\theta|}}{\sin h}\int_0^z f(z)dz\right] \qquad (6.28)$$

式中，z是从群体表面到作物丛内的垂直深度，f(z)是群体的叶面积密度。

在此基础上可以计算出作物群体单位面积上的最大光合量（P′），当h<α时：

$$P'=KE_0\sin h\left[1-\frac{1}{2}\frac{\eta c+\eta c'+\pi\cos\beta c'}{\eta+\frac{\pi}{2}\cos\beta}\right] \qquad (6.29)$$

式中，$E_0$为太阳入射的垂直光照强度，K为常数，c函数的形式为：

$$c=\frac{1}{2\pi\cos\alpha\sin h} \qquad (6.30)$$

$\beta c'$定义为

$$\beta c'=\begin{cases}\cos^{-1}\xi & 当\xi=\dfrac{-r-\cos\alpha\sin h}{\sin\alpha\cos h}\geqslant -1\\ \pi & 当\xi<-1\end{cases} \qquad (6.31)$$

式中，r是饱和光照强度$E_c$与$E_0$的比值。

以上是计算最大光合量模式。

## 参 考 文 献

〔1〕О.Д.谢罗建科著，农业生态系统的水—热状况和产量的数学模拟（裘碧梧译），气象出版社，（1985）。

〔2〕J.高德力安著，作物微气象学（王正非等译），科学出版社，（1985）。

〔3〕A.P.康斯坦丁诺夫著，天气-土壤-冬小麦产量(刘树泽等译)，农业出版社，(1982)。

〔4〕国家气象局农业气象研究所编译，农业生产动态模拟，（1985）。

〔5〕W.贝尔等著，作物-天气模式及其在产量预测中的应用（王馥棠译），科学出版社，（1980）。
〔6〕J.H.M.索恩利著，植物生理的数学模型（王天铎等译），科学出版社，（1983）。
〔7〕L.T.德威著，农作物同化、呼吸和蒸腾的模拟（裴鑫德等译），科学出版社，（1987）。
〔8〕F.W.T.彭宁德弗里斯等著，植物生长与作物生产的模拟（王馥棠等译），科学出版社，（1988）。
〔9〕刘树泽，有关农业气象数值模拟和模式的研究，气象科技，（4），（1980）。
〔10〕陶炳炎，农业气象模式简介，气象教育与科技，（1—2），（1980）。
〔11〕陶炳炎等，农业气象系统与分析，气象教育与科技，（1），（1983）。
〔12〕冯定原等，作物生长、发育模拟模式及其应用介绍，气象教育与科技，（1），（1988）。
〔13〕W.Baier, crop-weather analysis model: Reviews and Development, J.Appl.Meteor., 12（6），（1973）.
〔14〕R.W.Katz, Sensitivity analysis of statistical crop-weather Models, Agric.Meteor., 20（4），（1979）.
〔15〕W.Baier, Note on the terminology of crop-weather models, Agric. Meteor., 20（2），（1979）.

# 第七章　作物气象

作物气象一章是阐述作物生长发育、产量形成和产品品质等与气象条件的相互关系，目的是为促使作物合理布局与丰产栽培以及为发展生态农业、设施农业、立体农业、庭园经济等提供气象依据。

作物生产的实质是一个能量转换、物质循环和积累的过程。影响作物生长发育和产量形成的外界环境因素，首先是太阳辐射，它是作物生产的能量源泉。但在自然条件下，光照条件往往不是限制因子，对当前农业生产水平起限制作用的主要是温度和水分。空气是作物生存的重要因素和物质来源。农业气象学所着重研究的为其中的$CO_2$。它是作物光合作用形成有机物质的原料；特别是近代空气中$CO_2$含量增加，增高大气温度，可能引起气候变化，从而影响作物生产。

天气条件的影响多注意到农业气象灾害。旱、涝、风、霜、冷、冻等，在我国几乎每年在不同地区、不同季节都有不同程度的发生。

随着人们生活的提高，作物产品质量已越来越引起人们的重视。它对农业气象也提出了新的要求，从而为作物气象开辟了一个新领域。

## §1　水稻气象

### 一、气象要素对水稻生育的影响

水稻是我国主要的粮食作物之一。我国水稻播种面积，占全国粮食播种面积的三分之一，其总产量居粮食作物的首位。水稻在我国栽培地域很广，包括了热带、亚热带、温带和寒温带。由于自然选

择和人工选择的结果，形成了我国水稻多种多样的光温特性类型。

（一）水稻品种类型的光周期反应

地球上光照长度的变化，形成了水稻对不同光照长度的反应特性。一般说，在高温和短日照条件下，营养生长期缩短，幼穗分化提前；反之，幼穗分化推迟或不能抽穗。为了分析品种对日长反应的差异程度，中国水稻光温生态研究协作组用经验公式研究了水稻不同品种出穗促进率。出穗促进率大，感光性强；反之则弱。

1. 早稻的感光性　长期种植于北方地区的水稻品种受温度较低、光照较长的影响，逐渐形成感温性强，感光性弱的类型。因此，在其发育过程中，只要满足其对温度的要求，都能完成其生长发育过程。

2. 晚稻的感光性　晚稻是感光性强的短日照类型，对光照反应极敏感；随着日长变短，营养生长期也缩短，晚稻感温性也较强，在光周期诱导期间，也要求较高的温度条件。因此晚稻只分布在较低纬度地区。在高纬度地区，光照、温度条件都不满足其要求。

3. 中稻的感光性　中稻的基本营养生长性、感光性、感温性都居于早稻和晚稻之间，是两者的过渡类型。中稻的早、中熟品种感光性弱或基本没有反应，逼近于早稻，而迟熟品种感光性较强，则偏近于晚稻。但是，迟熟品种对温度的反应也较敏感，增高温度比缩短光照的反应更敏感。因此，可以说中稻更近于早稻。

总的来说，南方的水稻比北方水稻的感光性强，晚稻比早稻强，迟熟品种比早熟品种强。感光性强的品种对地区和季节的适应性较小，以感光性弱、基本营养生长期中等，感温性又不强的类型适应性最大。

（二）水稻品种类型对温度的反应

水稻的感温性也可取高温促进出穗率来研究其基本类型。一

般说，晚稻的感温性比早、中稻强，而早稻又比中稻强。在高纬度高温季节，光照较长，而光照短的季节往往又迅速降温，所以不宜晚稻栽培。早稻适应性广，南北方均可种植，还可作晚稻栽培。

水稻对温度的反应，除感温性强弱不同外，对适宜温度的要求也不一样，同一品种不同生育时期也有差异，这从南京农业大学研究广东水稻品种的结果（表7.1）可以看出。

**表7.1 不同水稻品种各生育期*起点温度**（℃）**

| 品种 \ 生育期 项目 | 分蘖期 | | 幼穗分化期 | | 出穗期 | | 灌浆期 | | 黄熟期 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 始期 | 盛期 | 始期 | 盛期 | 始期 | 盛期 | 始期 | 盛期 | 始期 | 盛期 |
| 南特16（早稻、早熟籼） | 14 | 16 | 15 | 16 | 12 | 17 | 16 | 20 | / | 17 |
| 卫国7（早稻、早熟粳） | 13 | 16 | 14 | 16 | 12 | 16 | 15 | 18 | / | 15 |
| 矮仔粘（早稻、迟熟籼） | 14 | 16 | 17 | 19 | 20 | 21 | 17 | 19 | / | 18 |
| 广矮4144（早稻、迟熟籼） | 14 | 16 | 17 | 19 | 17 | 18 | / | / | / | / |
| 雪粘（冬稻、迟熟籼） | 13 | 15 | 14 | 18 | 17 | 19 | 18 | 20 | / | 13 |
| 溪南矮（晚稻、中迟熟籼） | 15 | 16 | 16 | 18 | 12 | 16 | 16 | 19 | / | 16 |
| 金、凤（晚稻、迟熟籼） | 14 | 16 | 18 | 20 | 12 | 16 | 17 | 20 | / | 15 |
| 大、糯（晚稻、迟熟粳） | 14 | 16 | 16 | 19 | 12 | 16 | 15 | 19 | / | 15 |

* 生育期出现的个体数占群体≥10%为始期、≥50%为盛期。

** 表内温度值系每年年初最早、年终最迟进入生育期始期、盛期与前五天各日平均温度，用三年分期播种资料经统计求得。

在水稻一生中，幼穗发育期对温度反应较为敏感，此时温度异常，使减数分裂不正常，形成不育。据研究，出苗到幼穗分化

所需要的温度条件，以晚稻最高，中稻次之，早稻最低；在早、中、晚熟品种中，晚熟品种较高，中熟次之，早熟较低，籼稻对温度反应比粳稻敏感。

我国由南往北，纬度越高，适宜于水稻生育的高温越短。但是，水稻的感温和感光性是相互联系的，只有在适当的日长范围内，温度的影响才能起作用。感温性强的品种更是如此。水稻的感温性和感光性还综合起作用，感光性强的品种光照起主导作用；感温性强的温度起主导作用。

（三）水稻生育对水分的要求

栽培稻是由野生稻演化而来，野生稻是生长在沼泽（化）地区的沼泽植物。当前的栽培水稻虽然不要求一生都在水中度过，但水分条件是一个极重要的因子。和其他作物一样，水稻所需的水，一部分是生理需水；另一部分是生态需水。

水稻各生育期对水分的要求是不同的，以花粉母细胞减数分裂到花粉粒形成阶段对水分条件最敏感。这正是水稻一生中需水的临界期。但长期淹水，根系发育不良，也会引起减产。故生产上在水稻孕穗期常保持浅水层。水稻需水的第二个时期是开花灌浆期，此时对水分要求较多，缺水受旱，千粒重下降，产量不高。

（四）水稻光温特性在生产实践中的应用

研究水稻光温特性，可应用于引种、改制、栽培和育种等方面。

1．引种

在全国各稻区内相互引种，必须按照品种光温特性所揭示的规律，才易成功。

（1）早、中、晚稻的引种，首先要考虑品种原生地区的熟期与引种地区的地理条件。根据水稻气候分析，由南向北，纬度增加1度，出穗平均延长2.4天。由平地向高山，海拔升高100米也平均延迟2.4天。由西向东移5个经度，出穗可提早1天左右，也有延迟出穗的，依品种而异。

一般说，南稻北引，生育期延长或不出穗，宜用早熟品种，

北稻南移，生育期缩短，宜用迟熟品种，向高山引种，宜用早熟品种，反之用迟熟品种。

早籼型水稻感光性弱，感温性中等，短日高温生育期短；早粳型水稻也类似，在全国容易引种成功。

中籼型、中粳型，感光、感温中等，对不同气候条件适应性较窄，在气候相似的区内引种，易成功。

晚籼型、晚粳型，感光、感温性强，对不同条件适应性狭窄，引种要求严格。

（2）根据经济性状变化趋势引种。华南早稻向南、向北引种，株高变矮，粒数增多；华中早稻南移株高变矮，北移变高，粒数变化也分别变少和变多。

平原引向高原，株高变矮，粒数减少；高原引向平原，株高不变。

北方粳稻南移，株高和主茎叶片数减少，千粒重降低。

2. 规划稻作制度

前几年南北稻区都有增加复种指数的趋势。华南稻、稻、麦和三季连作稻，中季稻很关键，要求生育期适当缩短，秧龄弹性较大的品种；连作晚稻则要求感光性强的品种，保证抽穗期提前，以免寒露风危害；长江流域地区，双季稻季节矛盾大，早稻要求高中求早，晚稻则要求高中求稳。早稻要求早播早熟品种；晚稻要感光性强，大致能在9月20日前齐穗。

3. 确定适宜栽培季节

最适播种期，不仅要考虑水稻育秧期的温度，而且要能在大田生育期正常抽穗、开花、结实。但不同的品种，生育期与播种期迟早的关系又有所不同；同一品种，也因不同地区和不同播种期而使生育期有很大的差异。生育期的变化，非常复杂，主要是由于各品种的生育特性对温、光条件反应不同所致。

从温度条件分析，单季稻的生育需要温度由低到高，再由高而低；连作早稻则要求由低而高；连作晚稻则要求由高而低。各

地应结合不同品种特性和地区气候特点来正确决定播种期。

4. 杂交水稻的制种

杂交水稻是杂种，其后代产生严重的分离现象，为此，生产上使用的杂交水稻必须年年制种。目前生产上推广的杂交水稻，其亲本的生育期差异很大，要保证制种成功，必须解决亲本花期相遇问题。现在使用的组合亲本为感光性较弱，感温性较强。因此亲本的发育速度在很大程度上决定于生育期间的温度条件。用积温法可以较准确地解决杂交水稻亲本的花期相遇问题。

此外，在合理选配亲本时，需研究品种的光温特性。水稻的感光性强对感光性弱为显性。短日、高温生育期短的对生育期长的为显性。因此，可根据选种目标对发育特性的要求，合理选配亲本。现在生产上，一般要求感光性弱的高产品种，在选择亲本时值得注意。

## 二、产量构成因素的形成与气象条件

### （一）产量构成因素的分析

水稻单位面积产量是由单位面积上有效穗数、每穗总粒数、结实率及千粒重等因素组成。为了说明这些因素对产量的贡献及其变异情况，1981年江苏省设置专题试验的结果列于表7.2。它表明，水稻产量构成因素中，结实率和有效穗数的变异最大，每穗总粒数次之，千粒重的变异最小。前三项对产量有举足轻重的

**表7.2 产量结构因素分析（汕优2号，1981）**

| 项目 | 有效穗数（万/亩） | 每穗总粒数 | 结实率（%） | 千粒重（克） | 理论产量（斤/亩） |
|---|---|---|---|---|---|
| 平均值 | 17.96 | 154.4 | 69.4 | 27.2 | 1052.6 |
| 标准差 | 2.53 | 20.8 | 10.2 | 1.2 | 277.6 |
| 变异系数(%) | 14.1 | 13.5 | 14.7 | 4.3 | 26.4 |
| 比率* | 58.6 | 6.8 | 15.1 | 38.7 | 1 |
| 贡献**(%) | 25.8 | 36.6 | 9.7 | 27.9 | 100 |

* 比率指理论产量与各因素之比值，表示该因素发生一个单位的变化时理论产量的相应变化量。

** 贡献是指各因素对理论产量的贡献。

影响，当然也是受外界条件影响而变动较大的因素。

1. 产量构成因素在地理上和播期上的差异

水稻产量的形成是多种因素综合影响的结果。但从气象条件上来分析，地理位置及播期早晚表征空间和时间上的变化，对产量构成因素却有显著的影响，尤其在地理上的差异更为突出，其中有效穗数和每穗总粒数的差异达极显著水平，结实率的差异达显著水平，而千粒重只是在地理上差异达显著水平，播期上差异不显著（表7.3和表7.4）。

**表7.3 产量结构方差分析（汕优2号，1980）**

| 项目 | 方差来源 | 平方和 | 自由度 | 方差 | F计 | $F_{0.01}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 有效穗数（万/亩） | 总体 | 182.87 | 27 | | | |
| | 地理位置 | 108.68 | 7 | 15.53 | 7.58** | 4.03 |
| | 播期 | 41.32 | 4 | 10.33 | 5.04** | 4.77 |
| | 误差 | 32.87 | 16 | 2.05 | | |
| 每穗总粒数 | 总体 | 11959.92 | 27 | | | |
| | 地理位置 | 7949.80 | 7 | 1135.69 | 10.94** | 4.03 |
| | 播期 | 2349.80 | 4 | 587.43 | 5.66** | 4.77 |
| | 误差 | 1660.39 | 16 | 103.77 | | |
| 结实率(%) | 总体 | 2326.21 | 27 | | | |
| | 地理位置 | 1014.83 | 7 | 144.98 | 3.25* | 2.66 ($F_{0.05}$) |
| | 播期 | 597.29 | 4 | 140.23 | 3.35* | 3.01 ($F_{0.05}$) |
| | 误差 | 714.09 | 16 | 44.63 | | |
| 千粒重（克） | 总体 | 37.57 | 27 | | | |
| | 地理位置 | 20.46 | 7 | 2.92 | 3.56* | 2.66 ($F_{0.05}$) |
| | 播期 | 4.02 | 4 | 1.01 | 1.23 | 3.01 ($F_{0.05}$) |
| | 误差 | 13.09 | 16 | 0.82 | | |
| 产量（斤/亩） | 总体 | 1731376.47 | 27 | | | |
| | 地理位置 | 722461.17 | 7 | 103208.74 | 4.31** | 4.03 |
| | 播期 | 645946.54 | 4 | 161486.64 | 6.75** | 4.77 |
| | 误差 | 382968.76 | 16 | 23935.55 | | |

* 相关显著　　** 相关极显著

**表7.4 产量结构方差分析（$F/F_{0.01}$）汇总表（1980）**

| 项　目 | 有效穗数 | 每穗总粒数 | 结实率 | 千粒重 | 产　量 |
|---|---|---|---|---|---|
| 地理位置 | 1.88** | 2.71** | 0.81** | 0.88* | 1.07** |
| 播　期 | 1.06** | 1.19** | 0.70* | 0.26 | 1.42** |

* 相关显著　　　** 相关极显著

造成产量构成因素在地理上和播期上差异的原因是多方面的。但是，试验资料是在统一方案、统一技术措施的前提下获得的，可以认为这种时空上的差异主要是气象条件的影响。

2. 气象条件对有效穗数的影响

决定水稻有效穗数的主要时期是自生育初期起，至最高分蘖期后7—10天为止。根据大田观测资料分析，分蘖成穗率随分蘖产生的推迟而递减。如杂交中稻移栽后25天产生的分蘖，成穗率已下降到42%。可见，早生分蘖的多少对有效穗数有很大的影响。当然，有效穗数与大田移栽密度、每穴苗数及秧苗素质等也有很密切的关系。移栽后的基本苗数综合地反映了移栽密度、每穴株数及秧苗单株带蘖情况，代表大田初期茎蘖起始条件。基本苗数与有效穗数之间有极显著的正相关，这表明在一定范围内，适当增加一些基本苗可以获得较多的有效穗数。

江苏省杂交稻试验证明，移栽后约33天左右达最高分蘖期。这个天数，就同一播期比较，全省南北差异不大，而同一地点不同播期间，早播的比晚播的要长一些。这是因为水稻营养生长期的长短受温度（高低）、光照（长短）的影响而造成的。当平均温度为21.0—22.5℃时，有效分蘖期24—34天，平均温度大于22.5℃时，则缩短为16—24天。统计结果表明，移栽后3天（相当于返青期）至38天（相当于最高分蘖期后8天左右），其间35天的平均温度与有效穗数的相关最显著，平均温度高，有效穗数少，平均温度低，则多。至于与光照的关系，以始穗前20—10天间平均日照时数与有效穗数的相关较显著。据此，可拟合汕优2

号每亩有效穗数与每亩基本苗数，移栽后3—38天平均温度及始穗前20—10天平均光照时数之间的相关方程如下

$$E = 11.57 + 1.06A - 0.044T + 0.16S \qquad (7.1)$$

（样本数$n = 29$，复相关系数$R = 0.653$，$F_{计} = 6.19 > F_{0.01}$，剩余标准差$S = 1.83$）。

式中，E为每亩有效穗数（万/亩）；A为移栽后的基本亩数(万/亩)；T为移栽后3—38天内平均温度（℃）；S为始穗前20—10天平均光照时数（小时）。

（二）气象条件对群体形成动态的影响

1. 温度与叶面积系数

（1）温度与出叶速度的关系　分析温度与叶龄数之间关系得知，水稻叶片数（N）与播种到该叶片出现期内>10℃的积温（Σt）之间存在着明显的对数关系（图7.1A，B）。其模式见3.40式

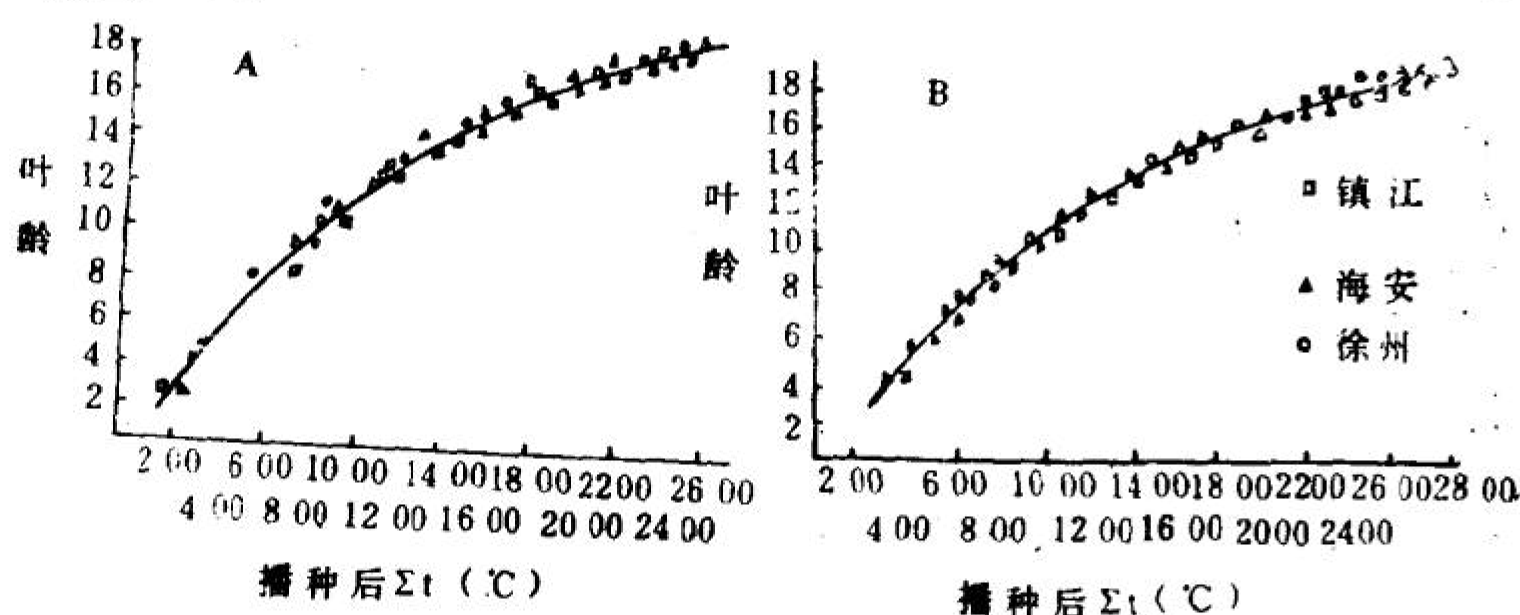



图7.1　叶龄与积温关系曲线

（A：汕优2号，25/4播种，n=73，B：南粳34，25/4播种，n=77）

（2）积温与最大叶面积系数　水稻叶面积系数消长与积温、出叶速度直接相关。同样，播种以后随着积温的逐渐增加，叶面积系数逐渐增大。到抽穗前后，叶面积系数达最大值，然后随着稻株的衰老而日趋减小。中稻在移栽后>10℃的积温达1600—2000℃时，田间叶面积系数达最大值。具体积温指标与播期早

晚、地理位置有关。例如汕优2号，淮北地区播种早的要1800—2000℃，江苏南部则为1400—1600℃；播种期较晚则积温值偏小，淮北约为1400℃，苏南受光照条件影响，却要1800℃才出现叶面积系数的高峰期；适期播种时，则没有地理因素的影响，皆为1700℃。南北积温值的差异，主要是淮北春季气温较低，苏南气温较高的缘故。

2. 气温条件对水稻干物质增长的影响

水稻各个生育期同化产物的累积与该时期外界条件的关系密切。对同一地点来说，水稻干物质的增加速度随生长期内温、光条件的优劣而变化。春季早期播种，气温偏低，移栽后15天内的相对生长率一般只有0.1左右，干物质累积的速度较低，平均每日增重仅有0.8公斤/亩左右；而较迟播种，同时移栽后15天内，相对生长率一般可达0.13左右，干物质的增长量平均每日为1.5公斤/亩左右。

（1）温度条件的影响　　热量状况对干物质增长的影响很大。一般认为水稻生长的起点温度是10℃，以>10℃的ΣT来反映热量水平，干物质随热量的变化率是该热量水平时干物质重量（W）的函数，

即
$$\frac{dW}{d(\Sigma T_{>10℃})}=F(W) \qquad (7.2)$$

根据Taylor定理，F(W)能以W的幂级数逼近，因此有

$$\frac{dW}{d(\Sigma T_{>10℃})}=Z+aW+bW^2+cW^3+\cdots\cdots \qquad (7.3)$$

显然，水稻干物质的增长，必须有秧苗存在才行。故当W=0时（即无秧苗时），就谈不上有增长率，其干物质随热量水平的增长率$\frac{dW}{d(\Sigma T_{>10℃})}=0$，因此Z=0。另一方面，随着>10℃的积温增加，水稻干物质的增长也不是无限的，当达到一定生育期时，干物质重量达最大值。其后尽管积温增加，干物质也

不再增长，即干物质增长率也趋向于零$\left(即\frac{dW}{d(\Sigma T)}=0\right)$。因此，要求$F(W)=0$应有两个根，即不仅$W=0$时，而且在W达到它的最高水平时$\frac{dW}{d(\Sigma T)}$都应为0。满足这个条件的F(W)的最简单表达式是其级数展开项止于$W^2$项，即

$$\frac{dW}{d(\Sigma T)}=F(W)=aW+bW^2=0$$

$$W(a+bW)=0 \tag{7.4}$$

F(W)的两个根就是$W_1=0$　$W_2=-a/b$。

显然，$W=-a/b$是不合理的，因为干物质不可能为负值，必须调整原式的符号。干物质和积温成正相关，aW也不可能为负，所以$bW^2$应为负值，原式应改为

$$\frac{dW}{d(\Sigma T)}=aW-bW^2=W(a-bW) \tag{7.5}$$

本式就是Verhulst-pear阻滞方程，改写为

$$\frac{dW}{W}+\frac{b\cdot dW}{a-bW}=ad(\Sigma T)$$

积分得

$$\frac{W}{a-bW}=ce^{a\Sigma T}$$

$$W=\frac{cae^{a\Sigma T}}{1+cbe^{a\Sigma T}}=\frac{a/b}{1+e^{-a\Sigma T/Cb}} \tag{7.6}$$

C为积分常数，再令$a/b=K$，$1/Cb=J$（均为待定常数），则可写为

$$W=\frac{K}{1+Je^{-a\Sigma T}} \tag{7.7}$$

本式表示水稻干物质累积过程与>10℃的总积温为阻滞曲线关系。式中K为最高水平，也可视为常数。根据各地实际产量水

平来确定。

根据江苏徐州、建湖、镇江三个试验点的资料，确定南粳34和汕优2号的最高水平（渐近线）K值和干物质与同期>10℃的有效积温资料，分别求出各地不同品种的参数值a、J（表7.5）。并根据W方程及表7.5中的参数绘出阻滞曲线，此曲线与干物质实测值吻合（图7.2）。说明阻滞方程可以较精确地描述干物质产量与积温的关系，比前人用指数函数表达，不仅在精度上要高，在物理意义上也更明确。还从图7.2看出，各地干物质增长率的不同情况。它使各地K值不同，K值是各地合理利用当地农业气候资源的复杂参数，这种规律在其它水稻品种上得到重演性结果。

**表7.5 江苏三地不同品种参数值**

| 参 数 | 徐州 | | 建湖 | | 镇江 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 汕优 | 南粳 | 汕优 | 南粳 | 汕优 | 南粳 |
| K | 2800 | 2600 | 2200 | 2300 | 2000 | 2100 |
| a | 0.00401 | 0.00368 | 0.00475 | 0.00402 | 0.00386 | 0.00348 |
| J | 485.298 | 223.790 | 495.157 | 188.890 | 198.328 | 101.559 |

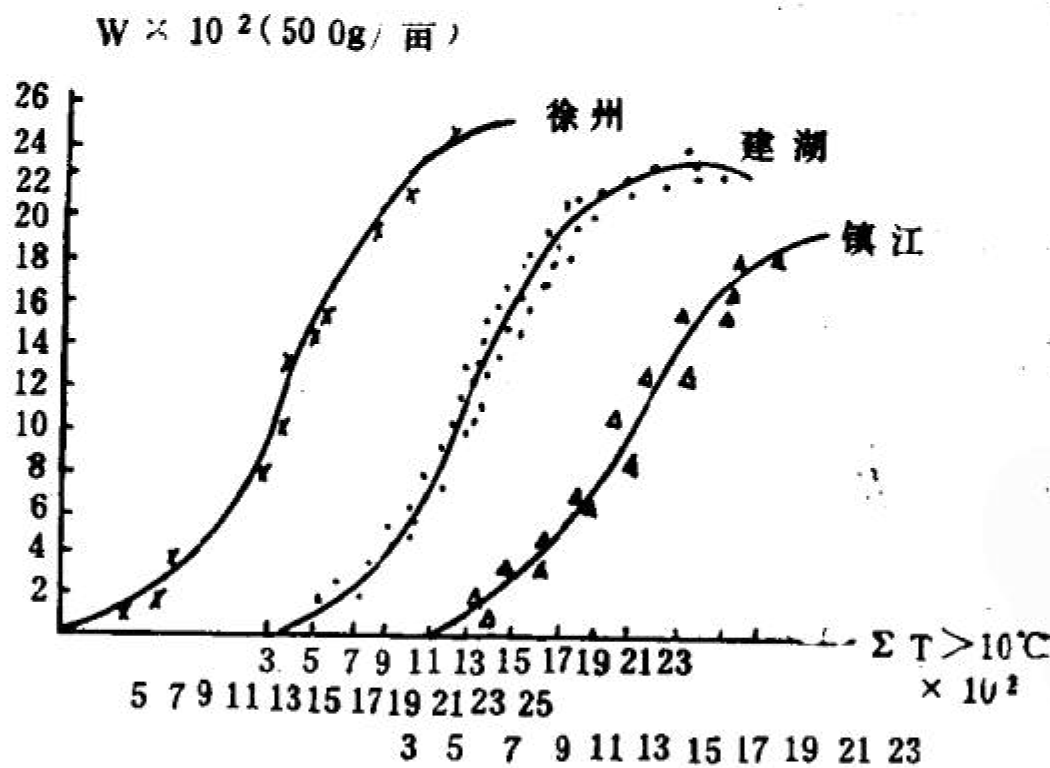
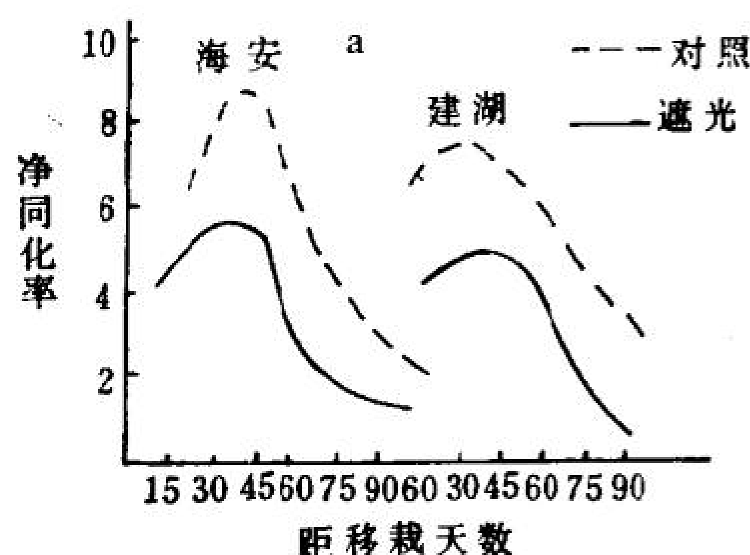



图7.2 南粳34干物质增长与积温关系

（2）光照强度的影响　　水稻的一生对光照强度要求比较严格。从图7.3就可明显看出，人工减光对净同化率和干物质增长均有不利影响。




a减光后对净同化率的影响

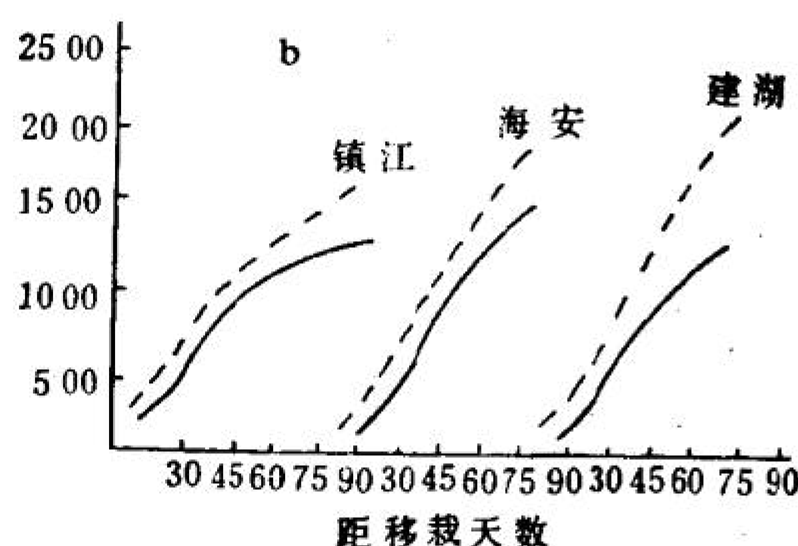



图7.3　b减光后对干物质增长的影响（南粳34）

水稻分蘖期光照不足，既影响分蘖速度，又会造成分蘖纤弱不能成穗，遮光处理后，成穗率明显降低。实际测定表明，光照条件恶化，影响光合作用进行，造成分蘖少而小（表7.6）。

幼穗分化期前后是水稻由营养生长逐渐过渡为生殖生长的关键时期，干物质积累的速度最快、量最大，正常情况下此时期平均每亩每日可增重20公斤，因此这时光照条件的优劣对水稻生长速度和净同化率的影响最大。

表7.6 分蘖期减光对干物质、相对生长率净同化率的影响

| 品种 | 地点 | 干物重(500克/亩) | | 相对生长率(日⁻¹) | | 净同化率(500克/亩·日) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 遮光 | 对照 | 遮光 | 对照 | 遮光 | 对照 |
| 南粳 34 | 镇江 | 258.8 | 426.8 | 0.05 | 0.08 | 3.30 | 5.88 |
| | 海安 | 138.8 | 219.6 | 0.07 | 0.08 | 5.47 | 6.97 |
| | 建湖 | 153.9 | 225.4 | 0.06 | 0.09 | 5.06 | 7.45 |

幼穗分化以后，光照强度主要影响水稻每株颖花数的多少以及千粒重的高低（表 7.7）。幼穗分化时期，光照越充足对稻穗生长越有利。幼穗分化初始阶段，光照减弱，穗长变短；颖花分化期，光强不足，阻碍生殖细胞的形成，颖花数大大减少；后期光照不足，颖花大量退化，不孕花增多，灌浆速度减慢，千粒重降低。

表7.7 幼穗分化期减光对穗粒结构的影响

| 品种 | 地点 | 穗长(厘米) | | 每穗颖花数 | | 空秕率(%) | | 千粒重(克) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 遮光 | 对照 | 遮光 | 对照 | 遮光 | 对照 | 遮光 | 对照 |
| 南粳34 | 镇江 | 16.3 | 19.0 | 55.8 | 68.4 | 33.3 | 24.7 | 25.9 | 28.3 |
| | 海安 | 16.3 | 19.2 | 49.0 | 84.4 | 30.6 | 20.8 | 23.4 | 26.8 |

### 3. 气候与水稻的生育型

如上分析，水稻干物质增长依阻滞曲线变化，但后期粒重增加，干物质仍继续增重，到灌浆末期，逐渐停止。这是一般规律。实际上由于气候条件的不同，生长曲线的变化是多样的，称为水稻的生长型。

生长型的曲线与稻株发育状况有密切联系，日本 Tanaka 按营养生长和生殖生长的转变过程，分为衔接、重叠和分离三个类型。衔接型：在分蘖数达到高峰，接着进入幼穗分化，出穗整齐，产量高。重叠型：幼穗开始分化时，稻株继续进行分蘖。由于营养生长和生殖生长重叠进行，营养分配上矛盾较大，因而穗

小粒少，抽穗不整齐，产量低。分离型：分蘖期与幼穗分化期之间有一段营养生长停滞时期。无效分蘖多，单位面积的有效穗数少。在营养生长停滞时，节间伸长，后期易倒伏，增产潜力小。

在水稻生产中，应根据当地的气候条件，相应采取促、控措施，使生长曲线符合衔接型，这是创高产的重要一环。但是，即使同一地区的气候，年际、季节之间亦有差异，要综合考虑并协调环境、品种和农业技术措施的相互作用，才能起到调节稻株生长型的作用。例如中稻类型品种，在气温较低时，营养生长期拖长，就易出现重叠型；气温较高时，则易表现为衔接型；如果气温较低，采用保温育秧，可使重叠型转为衔接型。

我国长江流域稻区，由于气候适宜，可以播栽单季早、中、晚稻，亦可种双季稻。早稻生长季节短，多属于重叠型，应使产量在稳中求高；中稻生长季节居中，多属衔接型，为长江流域历史上播栽面积最大的一种类型；晚稻多为感光性品种，生长季节最长，属分离型。如早稻采用保温育秧，晚稻改用感光性迟钝的品种，都有利于向衔接型调节。

华南稻区晚稻产量不稳，是由于营养生长旺盛，多属分离型的原因。如选用适宜品种，适当晚播，则可转为衔接型。

## 三、水稻气象灾害

### （一）水稻低温冷害

低温冷害是全国性的水稻气象灾害。南方稻区三熟制或双季稻区早稻生长处于由低温到高温阶段，早稻栽插过早，在其减数分裂时期仍有遇到低温的危险，造成危害；晚稻生长处于高温到低温的阶段，栽插期、品种类型和农业技术措施不当，则使其在抽穗开花期及灌浆期易遇低温危害。

#### 1. 水稻低温冷害的类型

一般分为延迟型冷害和障碍型冷害两类。北方稻区由于水稻生长季短，只要在生长季内温度偏低的年份，多出现延迟型冷害。障碍型冷害在南方稻区较常见。我国广大稻区，夏季多高温，秋

季降温较快，抽穗开花期的低温危害就成为全国水稻生产的普遍灾害，是我国水稻生产上的一个值得重视的问题。

2. 障碍型低温冷害指标的讨论

有关水稻障碍型低温受害指标，国内近十年来的试验研究较多，具体指标温度也众说纷纭，表达形式多样，概括起来有以下两方面的观点。

其一，低温指标随着不同的地理区域而改变，即在不同地区，往往有不同的低温受害指标，特别是高原、山区和平原地区的差异更大。如云南提出玉溪地区（海拔1600米）的水稻冷害指标为18.5℃，昆明地区（1900米）一般为18.0℃，丽江地区（2400米）则以16℃作为当地粳稻品种的冷害指标。江苏、上海一带，对杂交水稻的冷害指标一般提法为22—23℃，而湖南桂东山区日平均气温低至20℃时，杂交水稻的结实率仍较高。

其二，在同一地点、同一品种、同一试验水平，同一低温情况下，不同年份的受害程度也各不相同。即低温冷害指标有年际变化。根据江苏1977—1979年三年试验的定穗观测资料，绘制定穗空壳率曲线（图7.4和7.5）。从图上明显看出，三年有三条大致平行的空壳率曲线；变化趋势基本一致；在适温范围内，空壳率低而变化不大。如以30%定穗空壳率为受害标准，三年则有三

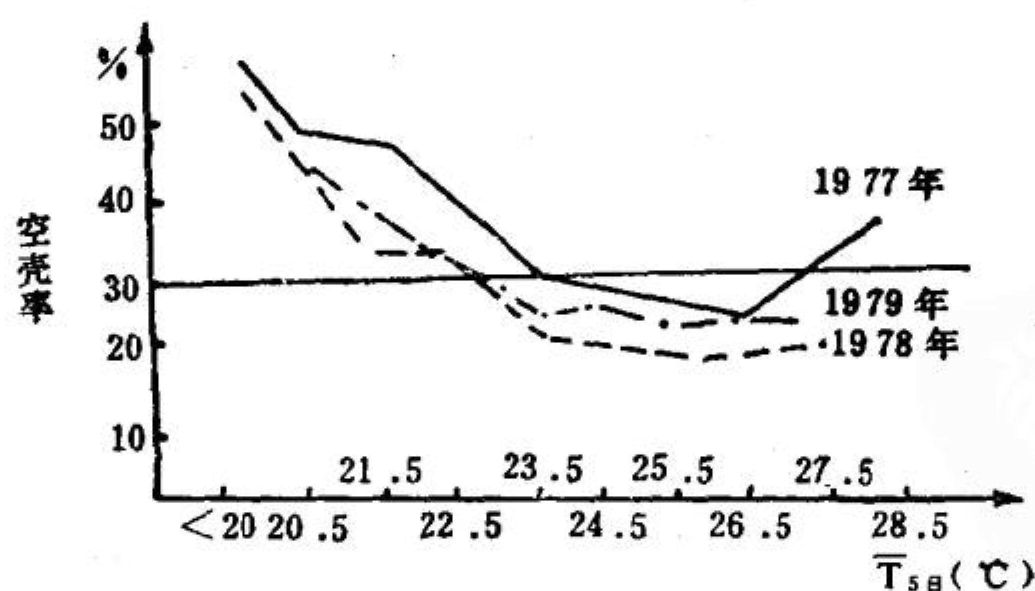



图7.4 抽穗期5天平均气温与定穗空壳率（南优2、3号）

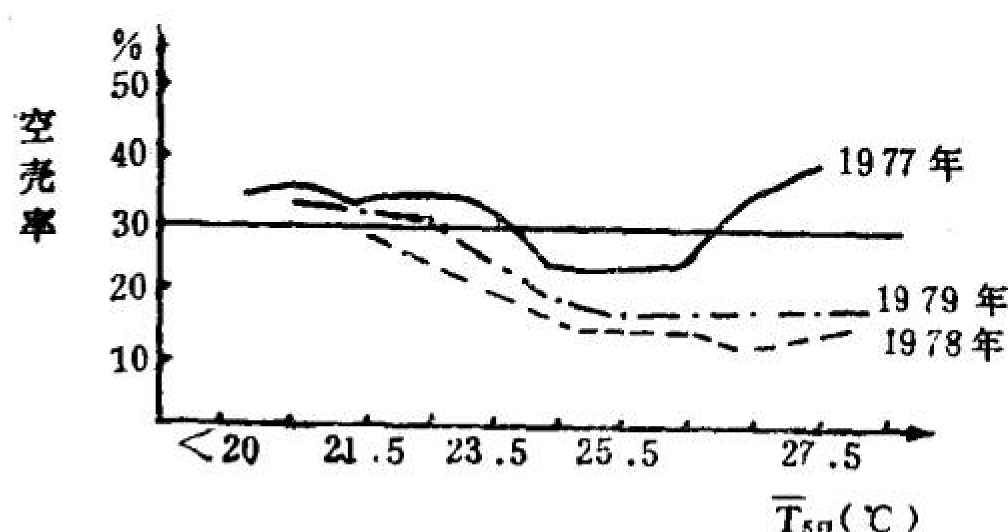



图7.5 抽穗期5天平均气温与
定穗定壳率（汕优2、3号）

个不同的受害低温数值。即在相同的23℃温度条件下，三年空壳率并不相同。

出现地区和年际间的差异，首先是由于地区之间的纬度、拔海高度、大陆度、地貌、土壤和植被状况的不同，造成地区间气候背景的差异。如随纬度的变化而出现光长的差异；随海拔不同，其辐射强度、光质也有变化。内陆和高山要比沿海和平原的温度日较差大。此外，各地秋季降温过程有的来得突然，有的比较缓慢。年际间变化是由于各年的气候年型不同。例如，年际之间不仅光照时数可以不同，它的昼夜温差也不一样。由前节已知，光温因子与结实率关系极大，也直接影响产量的形成。所以仅用温度来作结实受害指标，就难免众说不一。

以江苏省资料为例进行分析，从地区间的差异来看，光照因子应以光长变化为主，因为江苏为平原地区，南北高差有限。研究抽穗前15天和抽穗后5天共20天的平均气温与平均光照时数的关系，南北各点基本上都成直线关系（图7.6）。在相同气温下，北部日照多于南部，在相同的日照条件下，南部气温高于北部。由此可知，光温因子对结实率的影响程度各地有别。在安排水稻齐穗期时，苏北应着重考虑低温危害，临江、江南地区应着重考虑光照条件，即连阴雨、日照不足对结实率的不利影响。

年际间的差异（图7.4和图7.5）主要是由于光照条件不同而

引起的。因此我们设想了一种以低温指标为主，辅以光照多寡（包含有阴雨天数间接意义）的年型订正方法，以反映低温指标年际间的波动状况（表7.8）。

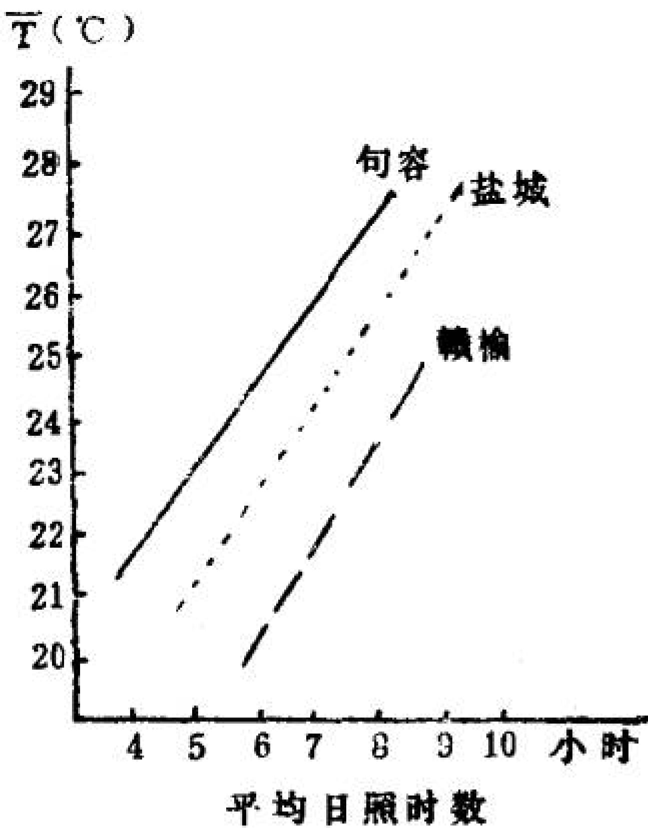



图7.6 平均气温与平均光照时数的关系

在水稻结实率的低温指标研究中，还可以分别两种类型，一种是表示冷害的低温临界值；另一种是表示降温强度及其持续时间与结实率高低的定量关系，同时也分别对不同发育时期表示出低温的临界值。如减数分裂期冷害的低温指标，江西省认为，当日平均气温出现20℃以下，同时最低气温13—14℃，且连续2—3天时，水稻空壳率达80%以上。一般认为，较耐寒的粳稻品种低温冷害指标为最低温度15℃左右，籼稻为17℃，温度愈低，低温持续时间越长，冷害就越严重；抽穗开花期，则认为五天平均气温低于20℃，最高气温低于25℃时受害。长江下游地区一般采用日平均气温低于20℃或者同时最高气温低于23℃且连续三天以上则为受害指标。灌浆期，尤其是灌浆初期，平均温度为19℃时秕粒率明显增加，温度越低，秕粒越多。所有这些指标温度，因地区而有差异。

**表7.8 不同年型水稻冷害指标（℃）*与高温热害指标（℃）**

| 品　种 | 低温指标（℃） | | | 高温指标（℃） | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 多照年 | 正常年 | 寡照年 | 多照年 | 正常年 | 寡照年 |
| 南　优 | 22.2 | 22.7 | 23.8 | 29.4 | 28.9 | 27.8 |
| 汕　优 | 21.0 | 21.8 | 23.7 | 31.1 | 30.2 | 28.3 |

* 指抽穗后5天内的平均气温

3. 低温冷害的防御

防御冷害的方法一般有（1）确定安全齐穗期，掌握气候规律，确定适宜播栽期，保证安全齐穗，是防止水稻低温冷害的战略措施；（2）培养与选用耐寒品种，根据不同茬口，搞好品种搭配，是防止水稻低温冷害的重要环节；（3）以水调温，调节农田小气候，减轻低温危害；（4）使用保温剂和喷“九二〇”等，提高稻田温度，加速植株发育，避过低温对花穗的危害。

（二）水稻的高温热害

盛夏伏旱期，光照强烈，当最高气温上升到35℃以上时，空秕率显著增加，所以通常以日最高气温35℃作为高温伤害的临界指标。开花期遇高温，造成花药干枯，空粒增多，谷粒形成期遇高温，导致“高温逼熟”而减产。我国北方稻区，水稻生长季内，很少有高温危害。水稻的高温危害多发生在长江以南地区，而且沿海地区也不严重。高温危害指标见表7.8。

（三）台风危害

台风经过的地方水稻常出现倒伏和脱粒，影响水稻产量和质量。据调查，在抽穗开花期倒伏，损失最重，可减产一半。黄熟期倒伏、减产1—2成。

此外，台风暴雨引起洪涝，直接侵浸农田，形成水涝灾害；台风过后，稻株受伤，多引起水稻白叶枯病的大发生。但是，在我国南方伏旱严重的稻区，台风雨却解除了旱象，有益于水稻生产。

## §2 小麦气象

小麦是世界上主要粮食作物之一，也是世界上分布最广的作物之一。它栽培历史悠久，除南极洲外，遍布世界各大洲，除少数亚热带岛国外，也几乎遍布每个国家。其垂直分布从海平面到海拔4000米以上的青藏高原都有种植；但集中产地分布在25—47°N和25—40°S，海拔1500米以下的温带。

## 一、光温因子对小麦发育的影响

小麦植株茎端生长锥开始幼穗分化表明生殖生长的开始，并顺序发生春化作用、光周期反应，导致抽穗开花。

（一）小麦的春化作用

春化作用是指冬小麦种子经过低温时段而后解除冬性，获得春小麦特性的过程。从小麦种子萌动到分蘖时期，冬小麦都可通过春化处理，以种子萌动时效果最好。

根据50年代我国学者的研究，认为中国冬小麦品种可以分为四个春化类型：

（1）春性　　春化作用要求在0—12℃条件下进行，3—15天完成；

（2）半冬性　　春化作用的适宜温度为0—7℃，20—30天内完成；

（3）冬性　　0—7℃下进行春化，30天以上完成；

（4）强冬性　　0—3℃下进行冬化，需要40—50天才能完成。

冬小麦品种形成不同的春化类型，主要是受各地冬季温度影响的结果，这和品种的起源地密切相关。我国冬小麦品种为：华南地区春性；长江流域半冬性；华北平原南部冬性；华北平原北部为强冬性。南方山地立体分布的小麦，山麓多为春性品种；山中部为半冬性，高山上多为冬性。

不同春化类型的小麦品种在我国的分布，用1月等温线表示，则1月平均气温-12℃以下地区为春播春性品种，-12—-4℃地区为秋播强冬性或冬性品种，部分地区为春播春性品种，-4—0℃地区为秋播半冬性或春性品种，0—4℃地区及4℃以上地区多为冬播春性品种。

（二）小麦的光周期现象

小麦是长日性作物。不同小麦品种对日长反应是不同的。根据黄季芳等人的研究，可将我国冬小麦品种分为三种类型。

（1）反应迟钝型　　每天日长8—12个小时，约16天左右就能完成光周期反应而抽穗，一般春性品种属此类型。

（2）反应中等型　　每天8小时日长不能抽穗，12小时日长，24天左右抽穗，一般弱冬性品种属此类型。

（3）反应敏感型　　要求12小时以上的光照30—40天才能完成光周期反应，冬性品种属此类型。

小麦光周期反应类型的形成与品种原产地及植株幼穗分化时期所处季节的光照条件有关。穗分化时日长相对较短，形成迟钝型，反之则形成敏感型。

现代生理学研究认为，叶片是接受光周期刺激的器官，小麦只要在所要求的低温下处理后，植株叶片就能进行光周期反应。叶片感受光周期刺激的能力主要与其生理年龄有关，幼嫩叶片感受能力很小，充分生长的成年叶片强，而衰老的叶片则没有光周期反应。

小麦进行光周期反应所要求的光照强度是相当微弱的，在曙暮光的条件下就能进行光周期反应。但在此条件下时间太长，因光合作用太弱，会使植株缺少营养而停止光周期反应。

（三）冬小麦气候适应性

不同冬小麦品种分别属于不同春化作用和光周期反应的类型。小麦品种类型不同，其气候适应性就有较大的差异，以是否能安全越冬、正常抽穗开花、形成一定产量为鉴定标准。

华南为春性品种，引种至长江流域即遭受冻害，或成熟期因高温而旱熟枯死，故适应性较差。长江中、下游的品种多为半冬性、冬性品种，引种至华北南部、关中平原和四川盆地，皆能正常抽穗开花，形成产量。但再往北移，则易受冻害，因此适应性中等。华北平原的冬性品种引种至河南、关中、苏北、皖北、或华北北部都能成功，故适应性最广。华北北部的品种引种到陇海铁路以南地区，则不能适应。由此可见，春性和强冬性品种或晚熟品种，气候适应性较差，而感温和感光性中等的半冬性、冬性或

早、中熟品种则较强。

实践证明，不同类型的小麦品种，在四川成都和陕西武功栽培，表现都较好。从越冬条件分析，这两个地区冬不太冷；从后期生育条件分析，都无高温逼热的现象；从光周期反应分析，各类型小麦品种都能正常抽穗、开花、成熟。所以，成都、武功两地很适合建立我国小麦品种资源库。

## 二、冬小麦各生育期与气象条件的关系

### （一）小麦适宜播种期

小麦适宜播种，对培育壮苗、安全越冬和产量形成都是有利的。从气象条件来看，小麦适宜播种期主要决定于气温和土壤水分条件。

1. 小麦适宜播种期气象指标

小麦种子发芽最适温度是20—30℃，下限温度为0—5℃，上限温度为38—39℃。在发芽温度范围内，随温度升高，发芽速度加快。在高温下，发芽虽快，呼吸作用也强，所以根、芽生长不健壮。故小麦播种的最适温度在北方为日平均气温15--18℃，长江中、下游为15—20℃，当日平均气温低于10℃或高于20℃时播种，壮苗难以形成。要形成壮苗，除有粗壮的根、芽外，还要在越冬前主茎上有5—6片叶，单株有3—5个分蘖。因此，生产上多用积温法推算适宜播种期。北方麦区形成冬前壮苗需要500—600℃积温（表7.9）。

**表7.9 小麦播种到越冬前所需积温（℃）**

| 地　区 | 播　种　期 | 播种到越冬前的积温值（℃） |
|---|---|---|
| 北京 | 9月22—24日 | 564.5 |
| 太原 | 9月22—24日 | 580.3 |
| 郑州 | 10月7—9日 | 569.4 |
| 济南 | 10月11日 | 582.0 |

北京农业大学在北京地区的多年试验资料表明，冬前积温小于400℃，难于形成壮苗，大于750℃又往往造成冬前旺苗，所以

冬前积温500—600℃和日平均气温15—20℃是冬性小麦品种适宜播种期的温度指标。长江中、下游地区的春性品种要推迟5—10天。

全国平原地区冬小麦播期主要由温度条件决定，大体上纬度每递减1度（或海拔每升高100米）播种推迟（提前）4天左右。北方冬麦区的北部适宜播期为9月中下旬，黄淮平原为10月上、中旬，长江中、下游为11月上旬，华南地区为11月下旬。

2. 小麦播种与秋、冬季气候的关系

小麦适期播种并非绝对保证苗好、苗壮，因为小麦播种时对水分条件也有一定的要求。最适宜的土壤水分为田间持水量的65—75%，如耕作层土壤水分大于85%或小于60%则不利于小麦出苗。北方麦区多发生秋旱，北方农谚说："赶时不等墒，抢墒不等时"。就北方种麦而言，夏季降水对小麦播种有重要意义，7—8月降水适宜，能满足小麦播种及苗期的底墒需要。

长江中、下游及南方麦区，播种时常遇连阴雨天气，造成烂耕、烂种，农田积水，小麦不能适期播种，或苗期发生湿害。

（二）小麦分蘖与气象条件

分蘖是决定小麦产量的重要因素之一。控制分蘖的消长可决定麦田群体结构的好坏。小麦分蘖消长与品种特性、土壤肥力等有密切关系，但气象条件对小麦也有重要影响。

分蘖对温度条件反应敏感。只有当气温高于3℃时，分蘖才缓慢地生长，6—13℃时，分蘖生长平稳、粗壮，13—18℃时分蘖生长虽快，但易徒长，温度再高对分蘖又起抑制作用。小麦在日平均温度14℃以上时，从出苗到分蘖一般只需半个月左右。据江苏农学院观察，扬麦1号在适期播种的范围内，从出苗到主茎第一分蘖出现，约需≥0℃以上有效积温140℃左右。从主茎第一分蘖出现到第二分蘖出生，需有效积温35℃左右。江苏淮南地区适期播种小麦，冬前分蘖在12月上旬出现，淮北则在11月下旬出现。

小麦分蘖期适宜的土壤水分为田间持水量的70—80%。土壤缺水，抑制分蘖的出生，土壤渍水，又使土壤缺氧，分蘖不能生长。江苏麦田往往发生这种情况，形成湿害。

小麦分蘖期要有充足的光照，据中国科学院植物生理研究所资料，光照不足，小麦的单株分蘖数，次生根数及分蘖干重都显著降低。

（三）幼穗分化与气象条件

研究幼穗分化与气象条件的关系，有利于控制小麦群体的有效穗数、粒数，争取在合理的穗数条件下，穗大粒多。

光照条件对小麦幼穗分化影响较大。小麦幼穗分化期适当缩短日照长度，可相应延长小穗分化期，使小穗数增加（表7.10）。

**表7.10　不同日长处理的小穗数（品种：农大183）**

| 项目 / 日长（小时） | 小穗数（个） | 小穗占14小时处理的百分率（%） |
|---|---|---|
| 14 | 14.0 | 100 |
| 10 | 19.8 | 142 |
| 8 | 21.3 | 152 |

光照强度的影响是光照越强，小穗形成越多。据李椒俊研究，光照强度不足，将使生长锥分化时间推迟，降低小穗分化速度，减少每穗小穗数（表7.11）。

**表7.11　遮光对小麦幼穗分化的影响**

| 项目 / 处理 | 生长锥开始分化日期（日/月） | 小穗原始体突起的日期（日/月） | 小穗数稳定日期（日/月） | 每穗小穗数（个） | 小穗分化速度（个/天） |
|---|---|---|---|---|---|
| 对照 | 7/12 | 21/12 | 18/1 | 20.6 | 0.74 |
| 遮光 | 10/12 | 28/12 | 8/2 | 17.2 | 0.41 |

小麦拔节期要求的适宜温度为15℃左右。但是无论在小穗分化期或小花分化期，温度稍偏低一些，可使小穗数目和小花数目

增加。这是因为在相对低温时穗花分化速度延缓，发生时间延长。所以适当调节播种期和温度对花穗生育的影响，是有利丰产的。

水分的多少对小花分化的影响比对小穗的影响更为明显。小花分化时段，正是小麦对水需要量日益增大时期。花粉母细胞四分体形成期是小麦需水临界期，如水分不足，将使小花大量退化，对产量形成不可逆转的影响。这时要求土壤水分维持在田间持水量的75—80%。

（四）小麦生育后期的气象条件

小麦后期是指抽穗开花和籽粒形成期。小麦抽穗开花期的最适温度为18--20℃，并要求晴朗天气。天气条件好，全田花期3—4天就可基本结束。如遇阴雨，气温偏低，光照不足，则开花不整齐。雌蕊柱头常因雨水冲击而失去生活力，结实率降低（表7.12）。

**表7.12 小麦开花期降雨对结实率的影响（福建农学院）**

| 品种＼项目 | 播种期（日/月） | 开花期（日/月） | 每穗结实粒数（个） | 结实率（%） | 开花期间 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 雨量（毫米） | 雨日 | 每日平均雨量（毫米） |
| 甘肃8号 | 27/10 | 6/3 | 44.4 | 92.5 | 4.1 | 3 | 1.4 |
| 甘肃8号 | 28/11 | 3/4 | 32.0 | 78.0 | 40.6 | 2 | 20.3 |
| 甘肃8号 | 29/12 | 4/5 | 24.0 | 63.1 | 57.7 | 5 | 11.5 |
| 晋麦2418 | 27/10 | 5/3 | 54.4 | 98.9 | 1.5 | 2 | 0.8 |
| 晋麦2418 | 1/12 | 29/3 | 33.3 | 82.4 | 48.6 | 5 | 8.7 |
| 晋麦2418 | 29/12 | 7/4 | 31.5 | 78.7 | 61.7 | 6 | 10.3 |

小麦开花期怕高温、干旱，如气温高于35—36℃，土壤水分又不足，花粉失去受精能力而降低结实率。

小麦受精结实后就进入籽粒形成期。灌浆持续时间主要受温度条件制约。灌浆期的适宜温度为18—22℃；上限温度为26—28℃；下限为12—14℃；如适温偏低，则持续时间长，千粒重

高。

裴鑫德等提出小麦灌浆速度与气象条件关系的模式：

$$V(t) = A \cdot B \cdot K_e^{-kt} \cdot (1 + Be^{-kt})^2 \qquad (7.8)$$

式中：V(t)为理论上的灌浆速度；t为开花至观测时的日数，A为本品种千粒重最大值；B，K为统计参数。

在（7.8）式中，实际灌浆速度V(w)与理论值有一定的偏差（ΔV(t)）。

$$V(w) = V(t) + \Delta V(t) \qquad (7.9)$$

根据计算值V(t)与实际测定值（V(w)）即可求得ΔV（t）。ΔV(t)值为正值时表示气象条件对灌浆有利；ΔV(t)值为负值时，则不利。

北京地区的实际资料说明，在灌浆初期（开花后1—15天）的适宜日平均气温为21—23℃；在灌浆中期（开花后16—24天）灌浆速度与日平均气温的关系极不显著，说明北京地区历年在这个时段，温度与灌浆速度之间的矛盾不突出；灌浆后期（开花后25天到成熟）两者之间呈显著性负相关，说明此时高温限制了灌浆的正常进行。高温持续两天以上，即对灌浆不利。刘振英等人强调，昼夜温度的配合极为重要，白天25℃，夜间18℃时对灌浆有利，昼温小于20℃，夜温小于15℃，ΔV(t)是负值。

**三、小麦品质与气象条件**

小麦品质与气象条件的关系主要是与太阳辐射、温度和水分等条件有关。

苏联学者研究认为，春小麦籽粒的蛋白质含量与抽穗到蜡熟期间的总日照时数极为相关（相关系数为0.905），并证明，当抽穗到蜡熟期实照时数相差25.6小时的条件下，春小麦面筋质量就有很大的差异，光照时数多的面团弹力为20毫米，而光照时数少的仅7毫米。为了提高面团的弹力，除在栽培中夜间供水，使白天的太阳辐射增加外，在苏联哈萨克斯坦西北部春麦产区，还以南北行向种植的春小麦品质明显地比东西行向为好。这是由于

在中高纬度地区南北行向种植的作物群体受光条件优于东西行向。这一点与我国北方麦区的研究结果相一致。

实践证明，我国北方生产的小麦蛋白质含量高。通常说：北方面食好吃。这从表7.13中资料可得到说明。根据崔读昌研究，小

**表7.13　不同地区小麦抽穗到成熟的平均气温与品质的关系**

| 地名＼项目 | 小麦品种 | 抽穗到成熟期平均气温（℃） | 淀粉含量（%） | 蛋白质含量（%） |
|---|---|---|---|---|
| 天　津 | 7336 | 21.8 | 52.0 | 13.72 |
| 武　汉 | 南大2419 | 19.2 | 53.5 | 11.15 |
| 广　州 | 努尔依 | 16.5 | 55.4 | 10.61 |
| 拉　萨 | 肥麦 | 15.0 | 56.9 | 8.37 |

麦蛋白质的地理分布与气温年较差的地理分布基本一致。一般说来，小麦成熟期日平均温度较高，其蛋白质含量偏高。小麦优良品质的形成与其千粒重高低也有关系。在较低平均温度下，千粒重高，籽粒蛋白质含量都低；在较高平均温度下，千粒重低一些，而蛋白质含量高。抽穗成熟期日平均温度与蛋白质含量呈线性关系（图7.7）。

我国南方小麦蛋白质含量低与水分条件有一定关系。日本北条良夫研究表明，在日本小麦灌浆成熟期正值梅雨季节的高温高湿下，蛋白质含量偏低，如果降雨期偏早，蛋白质含量则增加。

气象条件对小麦品质的影响虽然非常重要，但目前仍处于初步研究阶段，许多问题还有待进一步探讨。

**四、小麦的农业气象灾害**

小麦的农业气象灾害有干热风、冻害、霜冻害、湿害等，现简述如下。

（一）干热风害

春末夏初，长江以北地区处于大陆变性气团控制之下，高温干旱形成了北方麦区产生干热风的气候背景。小麦受干热风危

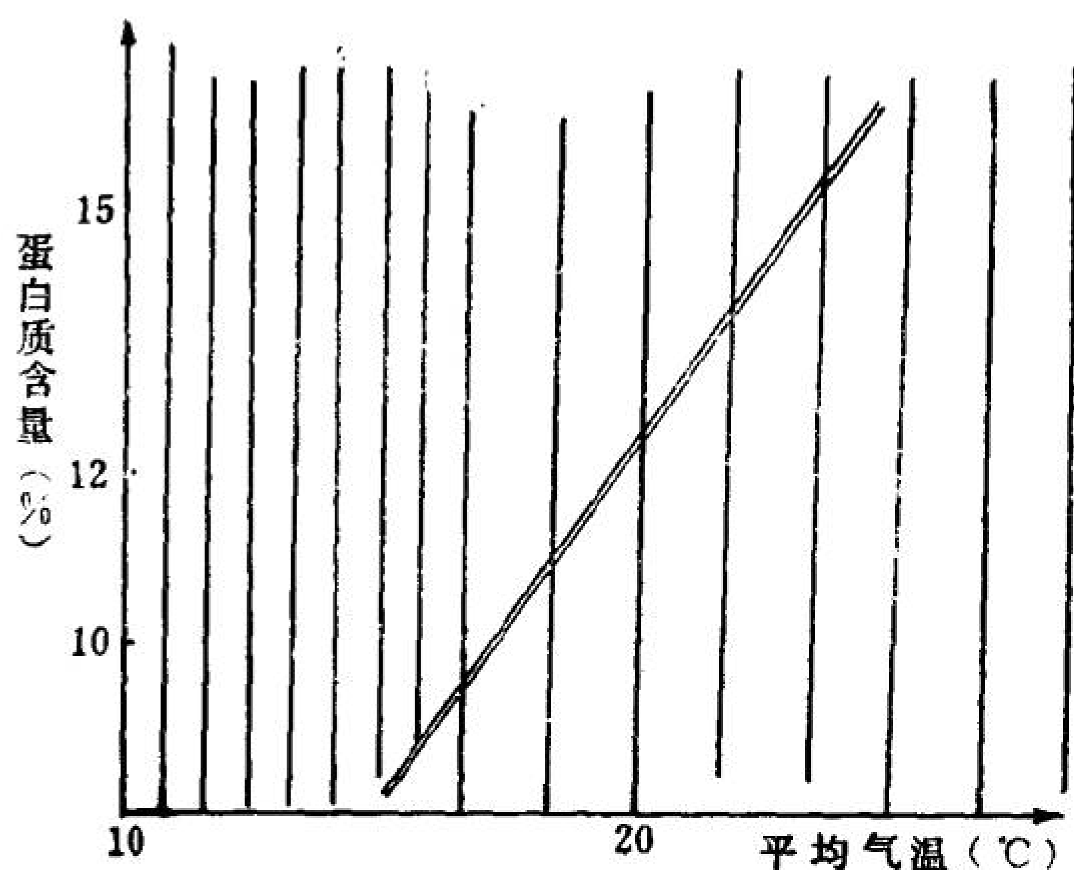



图7.7 小麦抽穗到成熟期平均气温与蛋白质含量关系

害，植株形态表现为颖壳发白，叶片和茎杆变成灰黄色，有芒品种“炸芒”。若遇雨后暴晴高温天气，并可导致茎叶青枯。受害的麦粒干秕、皮白、腹沟深，千粒重下降1—3克，多则5—6克。危害小麦的气象条件，依据小麦受害程度、和温、湿、风的不同组合，将干热风分为轻、重两级。不同等级干热风的标准见表7.14。

**表7.14 小麦受干热风危害的气象指标**

**（据北方干热风科研协作组）**

| 气象要素<br>等级 | 日最高气温(℃) | 14时相对湿度(%) | 14时风速<br>(米/秒) |
|---|---|---|---|
| 重干热风日 | ≧35 | ≦25 | ≧3 |
| 轻干热风日 | ≧32 | ≦30 | ≧2 |

我国北方麦区干热风危害最重的地区为冀中、冀南、豫东、鲁西和鲁西北。因为太行山的地势引起焚风增温而加重了华北平原

的受害。临汾、候马地区因汾河谷地的影响也形成重干热风区。敦煌、安西因受祁连山和沙漠的影响，也是重干热风区。新疆吐鲁番盆地为全国干热风特重区。塔里木盆地以若羌为中心，向盆地四周和沙漠边缘减轻，准噶尔盆地以莫索为中心向四周减轻。宁夏和内蒙的河套地区多为轻干热风区。所以，北方麦区的干热风危害是东西两头重，中间轻，并随海拔升高而减弱。

小麦是在扬花、灌浆、乳熟时期，从5月至7月受害，具体年份则随东南季风的变化而不同，在地理上是由东南向西北推迟。

浇麦黄水，营造防风林带，选育抗干热风的优良品种，喷洒化学药剂，以及运用综合农业技术措施等都是防御干热风危害的有效措施。

（二）冻害

我国冬小麦冻害主要有三种类型。

（1）初冬温度骤变型　在小麦刚进入越冬期，日平均气温骤然下降10℃左右，最低气温在－10℃以下，这时未经抗寒锻炼的麦苗受伤害。

（2）冬季长寒型　小麦越冬期持续低温，华北地区最低气温可降至－26—－22℃。降温幅度大，时间长，形成大面积死苗。北方积雪不稳时，冻害更重。

（3）冻融交替型　冬末春初，天气回暖，麦苗萌动。此时天气不稳定，乍暖乍寒，冻融交替，引起死苗。

小麦越冬冻害指标多用分蘖节处最低温度来表示。在一定低温下，植株50%死亡为临界致死温度。我国北方强冬性品种的指标多为－18—－16℃，弱冬性品种在冬末春初－8℃即致死亡。但是植株的抗寒性和其抗寒性锻炼有密切关系，隆冬小麦抗寒性最强，春初至返青拔节期，抗寒性迅速下降。

在研究冻害指标中，有人用极端最低气温、最冷月平均温度和冬季负积温等，都可作为研究冬小麦冻害的指标。

我国冬小麦冻害多发生在新疆北部、黄土高原、长城内外和华北平原。长江中、下游以南地区，冬小麦无明显越冬期，很少有冻害发生。但是在暖冬年，冬小麦年前拔节，再遇低温，则主茎冻死。

冬小麦越冬期间，除受低温直接危害外，还有土壤掀耸，即习称"根拔"，冰壳害、冻涝害、雪害等，这些对北方麦区的小麦有危害。

防御冻害首先要确定冬小麦种植北界，进行合理布局，进而采取农业技术措施，保护小麦安全越冬。适期播种，培育壮苗，进行冬前抗寒锻炼，提高冬小麦越冬抗寒能力也是防御冻害的有效措施。

（三）霜冻

小麦霜冻是在小麦拔节到抽穗期间遇上0℃以下低温所造成的危害。在华北平原和黄淮平原，冬小麦常受霜冻危害。长江中、下游地区及青海高原的小麦也时有霜冻侵袭。

小麦受害后叶片和茎呈水浸状，细胞结冰，叶片发硬，日出后冰融，叶面呈暗绿色，萎蔫下垂。穗部受害，则干枯或呈灰白色。

我国北方麦区在小麦拔节时期，气温低于0℃（或叶温低于－4℃），就有遭受霜冻危害的可能。但拔节后的日数不同，受害程度不一。在拔节后5天以内，小麦的抗寒力急剧下降，小麦拔节后5—15天，是雌、雄蕊分化期，是小麦对低温最敏感时期，抗寒力最弱（表7.15）。

霜冻前进行灌水保温，霜冻发生时熏烟等都是防霜冻的有效措施。实践证明，运用农业技术措施，预防霜冻，可以起到防霜冻，促高产的效果。

（四）湿害

湿害可发生在小麦的苗期，表现为僵苗不发，分蘖少，根系伸展受到抑制，叶片发黄，幼穗发育明显推迟。拔节至孕穗期对水分反应日益敏感，此时湿害，植株矮小，叶黄，无效分蘖和退化小花增加，减产严重。抽穗灌浆期湿害，根系早衰，植株水分供求

表7.15 小麦拔节期霜冻指标

| 霜冻等级 \ 气象因子 / 拔节后天数 | 最低气温（℃） | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 1－5 | 6—10 | 11—15 | >16 |
| 轻霜冻害 | －1—－2 | 0.5—－0.5 | 0.5—1.0 | 1.0 |
| 重霜冻害 | －4—－5 | －2—－3 | －0.5—－1.5 | 0.0 |

| 霜冻等级 \ 气象因子 / 拔节后天数 | 最低叶面温度（℃） | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 1—5 | 6—10 | 11—15 | >16 |
| 轻霜冻害 | －4—－5 | －3.5—－4.0 | －3.0—－3.5 | －3.0 |
| 重霜冻害 | －7.5—－8.5 | －5.5—－6.5 | －4.5—－5.5 | －4.0 |

失调，易出现高温逼熟。严重者根系腐烂，植株生理脱水而早枯。

形成湿害的原因：（1）生育期多雨、秋播期出现连阴雨天气，形成烂耕烂种，削弱了麦苗的抗逆性，不利高产。据江苏省气象资料分析，此种湿害平均约三年一遇。小麦拔节至成熟阶段，如遇梅雨季节提前出现，将招致严重减产。（2）水位过高。在低洼地区，河网水位难以控制，在多雨季节，地下水位上升，土壤积水，麦株受害。（3）土壤粘重。南方为水稻土，土质粘重，透水性差。排水设施不良，易形成湿害。

防治湿害的方法，主要原则是清沟排水，改善耕作层土壤通气条件，降低地下水位，排除地表水和潜层水。在低洼地区可联圩并圩，内外河分开，控制河网水位。采取综合农业技术措施，实行合理的水旱轮作，选育耐湿品种等都是有效措施。

## §3 棉花气象

### 一、棉花生育与气象条件

（一）温度

热量条件的优劣不仅影响其生育进程快慢，并且对产量高

低、品质好坏起关键作用。

棉花在不同生育时期对温度的要求不一。例如，棉花在发芽和出苗时，不同品种的棉籽，发芽的最低温度为10.5—12.0℃，最高温度是40—50℃。在临界温度内，温度越高，发芽越快。棉花的出苗情况，亦与发芽相类似，在10℃以下不能出苗，在10—35℃范围内，温度越高出苗越快，从播种到出苗的天数也越少。棉花苗期一般要求温度在20℃以上，如果温度低于17℃时，会严重影响幼苗生长。

花铃期热量条件优劣程度，决定着棉铃生育速度、成铃和成熟度。据中国农业科学院棉花研究所的资料，南北棉区棉铃期所需积温基本一致，棉铃正常吐絮的积温指标是≥15℃活动积温1300—1500℃；棉铃基本吐絮的最低临界指标为≥15℃积温不得少于1100℃。同时棉花铃期长短与温度关系也极为密切。

棉铃生长第7—14天的个体生长速度，在平均温度为27—29℃时，日绝对增值约为1.5〔毫米〕$^3$；22—24℃时，日绝对增值不超过1〔毫米〕$^3$；20℃左右时，为0.4—0.5〔毫米〕$^2$，可见棉铃生长速度有随温度的降低，日增值减小的趋势。

棉花纤维生长速度也与温度关系密切。正常棉铃一般在20—25天纤维即可长成应有的长度，进入纤维加厚充实阶段。在该时期，适宜的高温有利于进行光合作用及有机养料向棉铃内运转，加速纤维素的沉积。例如，在7月上旬至8月上旬开花的棉铃，前25天的日平均温度为25—27℃，后30天为20℃或以上，单铃籽棉率可高达70%以上，籽棉重相当于铃壳重的2—3倍。而9月初开花的棉铃，后30天的日平均温度已降到18℃以下，阻碍了铃壳内可溶性碳水化合物向棉铃内的转移，纤维素沉积速度大大减慢以至停滞，籽棉率仅有50%左右，籽棉重与铃壳重相近。

近年来，棉花纤维品质的优劣是各国十分关注的问题。在我国棉区，一般情况下，8月中旬前开花的棉铃，铃期平均温度为20—25℃，50日铃期间≥18℃活动积温为900—1250℃时，纤维

素沉积得多，成熟好，品质符合要求。如铃期平均温度降至20℃以下，50日铃期间≥18℃活动积温不足800℃时，纤维强度、断裂长度均较差，细度也达不到要求。

（二）水分

棉花产量的高低与棉田耗水量密切相关。在良好的栽培条件下，棉花生长期每亩棉田总耗水量多在450—620毫米的范围内。据实验表明，耗水量随着产量的提高而相应增加。在正常的气候条件下，当每亩耗水量为400毫米左右时，产量增加快、耗水量增加也快；当每亩耗水量为550毫米时，产量增加快，耗水量增加则较慢；当每亩耗水量增至600毫米左右，常可获得较高的产量。如果耗水量进一步增至650毫米或以上时，则往往由于徒长而使产量渐趋下降。由此可见，水分过多或过少对棉花增产都属不利。据中国农业科学院棉花研究所的实验资料表明，棉花对水分的需求量在其不同生育时期有显著区别。

棉花各生育期对水分因子的具体要求分述如下：

（1）苗期　以田间持水量的55—65%对出苗有利。在盐碱土条件下，需在较高的土壤湿度下才能顺利出苗。当含盐量在0.1—0.2%时，要求在田间持水量的70%；含盐达0.2%以上时，要求为田间持水量的90%。晚播棉花因地温升高，相应土壤湿度也要提高，一般以70—75%为宜。

（2）蕾期　进入初夏，棉田耗水量增加，每天每亩地约需3—4方水，此阶段要求田间持水量为65—75%。据研究，缺水时及时浇水能增加伏前桃，并减少蕾铃脱落，有10%的增产效果。如水分达田间持水量的80%，则应加强中耕，控制水分。

（3）花铃期　棉田叶面积达最大值，需水量也进入高峰期。此阶段需水占总耗水量的50%，土壤水分以占田间持水量的70—80%为宜，低于60%明显受害。黄河流域棉区此时常为雨季，需注意培土防渍。长江流域棉田应防伏旱。西北内陆棉区增加浇水次数，能明显降低脱落率。据山西省农业科学院调查，前期土

壤水分为田间持水量的60%的棉田，遇一次160毫米降水过程，每株平均脱落9.5个。而前期水分为田间持水量的70%的棉田，遇雨后平均每株脱落仅4.6个。

（4）吐絮期　此期需水较少，以占田间持水量65—70%为宜，吐絮中后期土壤湿度还应继续下降。

国家气象局曾根据1959年河南大旱情况，将河南56个台站土壤水分资料结合许昌地区棉花生产实际情况用点聚图法求出棉花旱象指标见表7.16。

**表7.16　棉花现蕾到絮期干旱受害土壤湿度指标**

| 受害表现 | 白天凋萎夜晚恢复 | | | 白天夜晚均凋萎 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 土深度层（厘米） | 10 | 20 | 30 | 10 | 20 | 30 |
| 土壤湿度（%） | 5—8 | 7—10 | 8—12 | 3—6 | 4—8 | 6—9 |
| 受害表现 | 蕾铃脱落 | | | 蕾铃大量脱落 | | |
| 土层深度（厘米） | 10 | 20 | 30 | 10 | 20 | 30 |
| 土壤湿度（%） | 6—9 | 8—11 | 9—12 | 3—7 | 5—8 | 7—10 |

（三）光照

棉花习惯于在较强光照条件下生长。棉叶的光饱和点较高，约为5万勒克斯，有的资料还提出为7万勒克斯。盛夏中午一般光照强度可达10万勒克斯，多云天气只有2.5—3万勒克斯，阴天时在1万以下。这表明只有在晴天强烈光照条件下，棉花光合作用效能才能得到充分发挥。棉叶的光补偿点为1千勒克斯，盛花期高产棉田下部光照常处于光补偿点附近或以下。据中国科学院上海植物生理研究所研究，棉花群体光能利用率不仅要看光合强度，还要看叶片数量、叶面积系数。棉花从4月中旬播种到7月上旬始花期，叶面积系数仅达到7，显然早期棉田不能充分利用光能。当叶面积系数达7以上时，中下层叶片仍可利用光（实际叶片交错，有一部分光从上层射到中下层）。随着棉花的

生长，中下层叶片受到的光强越来越弱，平均每透过一层叶子，光强下降1/3左右。

上海植物生理研究所通过对棉花群体光能利用的研究指出：（1）高光强下（夏季晴天中午前后）上层叶片光合作用达饱和或接近饱合点，二层叶片虽受光弱些，但光合强度并不减少很多，只有在三、四层叶片处光合强度才明显下降。由于有二、三层叶片在中等光强下进行光合作用，光能利用率较高，因此在强光下群体总的光合强度比单层叶片几乎高一倍。（2）群体叶片层多到一定程度，下部光强就会降到光补偿点以下，这以下叶片就不能吸收$CO_2$。从图7.8看出，当叶面积系数为3时，群体光合作用强度达最大。

中国农业科学院棉花研究所认为丰产棉田盛花期前后，棉株中部光照应保持在自然光照的15—25%，下部应保持在10—15%。如中部光照降到10%以下。下部降到2—3%，将会大大增加蕾铃脱落。

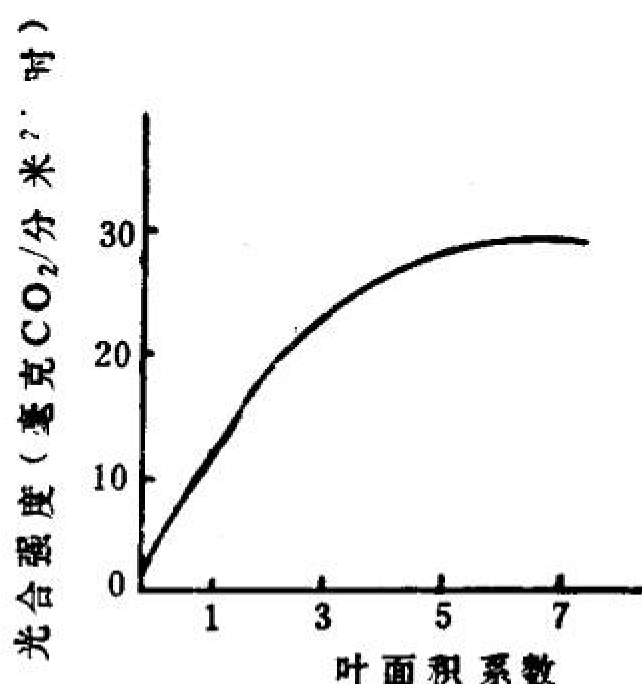


图7.8　不同叶面积系数的光合强度

## 二、棉花栽培的气象问题

从气象条件分析，影响棉花产量年际间波动最大的是播期、蕾铃脱落以及铃重和烂铃等。

### （一）气象条件与播种期

确定棉花适宜播种期对夺取棉花丰产有极为重要的意义，它可使棉苗达到“早、全、齐、匀、壮”的标准，为高产打好基础。

“早”，就是适宜早播，可充分利用自然条件，延长棉花生育期，使棉株有可能早出苗、早发育、早座桃、多座桃；“全”，要求一次播种出全苗；“齐”，要求棉苗生长一致，不因苗情不

一而出现大小苗、早晚苗，强弱苗的差异；"匀"，要求留苗均匀，株距适当，合理利用空间。在适时早播的基础上，力争苗全、苗齐、苗匀、进而达到苗壮的要求。

1. 适期早播的生物学意义

根据华北地区播种期资料分析。多数以4月5日、10日两播期效果最好，一般比4月20日播，早出苗8—9天，早现蕾3—5天，早开花2—3天，增产5—10%。河北省巨鹿县气象站总结了适播期（4月16日）和晚播（5月15日）棉花对比试验结果（岱字15号）：（1）适期播，伏前桃2—3个；晚播无伏前桃；（2）适期播，每株成铃9个，桃大而圆；晚播每株成铃6个，桃小而尖。（3）适期播，霜前花90%；晚播仅60%；（4）适期播，节间短，第一果枝离地面10厘米；晚播第一果枝离地面15厘米；（5）适期播比晚播增产37.7%。

适期早播自然不是盲目早播，过早播种由于地温低并不能使出苗和生育期相应提前，且苗期生长缓慢，易遭病害。播种过晚，虽生长较快，但苗不健壮，生育期推迟，于生产也不利。

在不同气候、土壤等条件下，适期早播的实际意义不完全同。华北旱地棉田，春季干旱升温快，晚播墒情差，难得全苗，适期早播是保全苗的重要措施；特早熟棉区，由于生育期短暂，为取得较长生长季节，适期早播极为重要。有的资料曾提出该棉区"5厘米地温稳定在12℃时播，在晚霜来临前较早出苗"的提法。长江流域棉区常年4月多雨，土壤湿度过大，温度上升缓慢，适期早播意义不大。对低洼、盐碱和土质粘重地区，地温上升慢，也不应提倡早播。至于棉麦套作区更不宜早播，否则共处期过长，易形成弱苗。

2. 播种期指标

影响棉花播种期的主要气象因子有温度、霜冻、土壤水分。

（1）温度指标　前华东农业科学研究所曾系统进行三种棉种发芽试验，求出各品种发芽最低温度为10.5—12.0℃，岱字

15号在定温条件下11℃不发芽，12℃下11天发芽，13℃下7天发芽，16℃下5天发芽，在变温条件下发芽加快。北京农业大学对密字103号22个播期资料用最小二乘法计算发芽最低温度为9.0℃；前西北农业科学研究所对“517”品种求得发芽最低温度为9.0—10.2℃。概言之，我国陆地棉各品种发芽生物学最低温度在9—12℃之间。但作为生产上播种期指标，上述发芽最低温度，仅能作为适期早播的下限温度来考虑。

综合我国各地资料，棉花播期温度指标是5厘米地温稳定达到（或通过）12—15℃。

播种适宜温度指标一定要因地而异，黄河流域棉区的旱地棉田、特早熟棉区、西北内陆棉区以5厘米地温稳定达12℃即可，华北灌溉棉田、套作棉田、低洼盐碱地棉田以稳定通过14℃为宜，长江流域棉区则应在5厘米地温通过15℃后为妥。

（2）霜冻指标　我国北方棉区（包括特早熟、西北内陆及黄河流域北部棉区）由于无霜期短，生育期有限，为充分利用生长季和争取早发，在生产上广泛采用“霜前播种，霜后出苗”的措施。因此个别年份就会发生霜冻危害的问题。山东省提出轻霜指标（棉田受微冻）为地面最低0.5℃，相当最低气温为3—4℃，重者（死亡率50%）地面最低为-0.5℃，相当最低气温为2—3℃。

（3）土壤水分指标　长江以南地区，春季多雨，土壤潮湿，应注意田间排水以防烂籽。北方棉田多数年份春播时墒情差，除积极保墒外，提倡冷水浸种以加速种子发芽。

总括上述分析，全国最早播种地区（除华南棉区外）是新疆吐鲁番系3月下旬；其次南疆地区4月初；广大黄河流域（除北部唐山地区外）适播期均在4月6—20日之间；长江流域棉区除川中一带偏早外，中游湖北为4月上旬，下游迟至中旬；全国最晚播区为特早熟棉区及河西、北疆等地为4月下旬至5月上旬。

## （二）气象条件与蕾铃脱落

我国主要植棉区蕾铃脱落率一般在60—80%左右。从脱落时间看，每年6月上、中旬开始，7月落蕾多，8月落铃多，脱落最严重的时期为盛花期。黄河流域棉区集中在7月下旬至8月上旬（雨季高峰），长江流域集中在8月份（伏旱高温）脱落。

落蕾时期集中在现蕾后10—20天内，10天内和20天后脱落较少。早现的蕾当时因棉株上花数量较少，棉田通风透光好，养料供应充足，脱落少。后期蕾由于和幼铃同时生长，养料供求矛盾加大，脱落增多。棉铃脱落集中在开花后3—10天内，据河北省调查资料，在开花后3—10天内脱落达85.6%。

脱落原因，粗略概括为生理、气象和病虫害三方面原因。从生理脱落看，迄今为止多数科学工作仍以营养学说来解释脱落现象。

### 1. 不良气象条件引起的脱落

（1）光　光是影响蕾铃脱落的最主要环境因子，尤其在水肥充足的密植棉田中，枝叶重叠，中下部郁闭严重，光就成为蕾铃生长的突出矛盾。过兴先、邓洛普（A.A.Dunlop）等人都研究了光照对蕾铃脱落的影响。过兴先等测定在郁闭棉田下部光照显著减弱，叶片干物质减轻，减少现蕾和开花数，增加蕾铃脱落。光是进行光合作用的必要条件，光照不足影响碳水化合物的形成。植株体内含糖量下降，蕾铃脱落增加，同时在弱光下也减慢养分自叶片流入生殖器官的速度，不利于花蕾幼铃发育。徒长棉田生长过旺，封行提前，下部叶片严重缺光，使下部蕾铃得不到必要营养而大量脱落。

（2）水分　水分是影响蕾铃脱落的另一个重要气象因子。奚元龄指出，当土壤水分在20%以下时脱落与土壤水分成负相关，但当土壤水分在20%以上时，脱落与土壤水分成正相关。山东省水利科学研究所1959年总结全省棉花灌溉试验得出，当土壤水分在田间持水量60%以下或85%以上时，由缺水或水分过多

均导致蕾铃大量脱落。

（3）降雨　开花当天遇雨，雨水冲散正在开放花中的花粉，并使花粉吸水破裂丧失生命力；使其不能正常授粉而脱落。因此在开花期间雨水越大、越猛，持续时间越长，幼铃脱落越严重。

为证明雨水是造成脱落的直接原因，国外有资料提出喷灌能使当天开花植株发生脱落造成损失。有文献指出，上午10时喷水落铃为50%，下午1时后喷水脱落仅为25.7%。据植物学报中有关资料报导，有人曾用人工喷水方法证明水分进入花朵后，从而引起幼铃大量脱落。

（4）温度　开花期遇异常高温也会造成蕾铃大量脱落。例如，吐鲁番地区异常高温超出棉花对温度要求范围，使幼铃脱落增加，超出范围越高，脱落越多。108φ品种在日平均30℃以下时脱落不多，在30℃以上脱落增加，32℃以上脱落剧烈增加。山东菏泽地区1973年7月中下旬出现13天35℃以上高温日，严重影响盛花期授粉过程，使这段时期的脱落率占总脱落率的76%。

2. 增蕾保铃途径

（1）调节营养生长和生殖生长之间的矛盾　棉花要保证高产、减少脱落，首先要采取措施使植株上、中、下三部分均匀座桃：(i) 早座桃，多座伏前桃。这不仅为多结桃和结大桃赢得了时间，更重要的是调节了棉株体内有机养料的运转，减低了徒长趋势，为确保伏桃奠定基础；(ii) 狠抓伏桃，伏桃营养生长和生殖生长均极旺盛，有80%的花在此时开放，但脱落也最严重，因目前大面积棉田仍是肥力不够。(iii) 要防早衰，从盛花期到盛铃期，植株营养生长已近末期，但生殖生长仍在进行，如放松管理则易出现脱水、脱肥现象，形成早衰，也能造成10—20%的减产。

（2）改善田间小气候　(i) 合理密植。在目前生产水平下，盛花期棉田合理的叶面积系数应在3—3.5之间。一般肥地宜稀，瘦地宜密；水浇地宜稀，旱地宜密；降雨量多的地区宜稀，

干旱少雨地区宜密。既保证群体有较高的生产率，又保证单株有较高的成桃率。应避免过分密植导致田间小气候条件恶化。(ii)合理的水肥管理。要求棉花前期生长要稳，适当推迟封行期，为花期创造良好的田间小气候。中后期注意加强水肥措施以防早衰。(iii)及时整枝。适时打顶，打边心、去疯杈是保证株间通风透光，使中下部株间光照得到改善的有效措施，也是减少脱落的重要手段，同时还避免有机养料无谓的消耗，使养料较多地供给中下部果枝及蕾铃的需要。(iv)处理好套作棉田的栽培。麦棉套作棉田，对棉花而言，有利也有弊。苗期受麦子影响，长势较差。花期由于麦子已收，从单纯小气候看是有利的。但由于套作影响，倒茬、整地及病虫害等还存在不少问题。因此，无论从套作比例。套作时间、套作管理上，都尽可能使棉花生长处在有利的条件下，以获得高产。

（3）其他措施　北京农业大学多次试验证明，花铃期喷萘乙酸（浓度0.001%），能使脱落减少5—10%。新疆建设兵团花期喷磷也取得良好增蕾保铃效果。此外，在雨季盛花期进行人工辅助授粉，也可减少脱落、增加铃重。

（三）气象条件与铃重、烂铃

棉花产量是由每亩总铃数、铃重和衣分构成。其中衣分基本上由品种遗传性状所定，变化不大。但铃重起伏很大。从新乡县（8年资料）和启东县(13年资料)统计，百铃重变异系数达10%左右。其历年百铃重最大变幅分别达34.4%和52.6%。1976年两县百铃重下降到249克和229克。根据近几年观察，铃重下降和波动对产量影响十分显著。同时由于铃重下降，籽指也相应下降，棉籽成熟度差，嫩籽率增加，则又影响到第二年播种和全苗。

1. 铃重下降原因

棉铃成熟需一定的环境条件，在肥水基本满足时，热量条件对铃重起决定作用。在生育后期遇冷空气侵袭而降温，连阴雨天气，棉铃不能正常成熟，就易发生铃籽瘪、霜后花多的现象。上

海农业科学院记载1978年8月1—11日开花的伏桃，平均铃重为5.6克；8月16—26日开花的秋桃，平均铃重为5.19克；8月31—9月10日开花的晚秋桃，平均铃重为4.14克；9月15日开花的末秋桃，铃重仅2.95克。籽指（百粒重）也从10.3克降为5.0克。一般中熟陆地棉品种从开花到吐絮需大于或等于10℃活动积温1350—1400℃（上海为1400℃，安阳为1350℃，北京为1360℃），热量不足就不能满足棉铃正常发育需要，铃重有随活动积温降低而变轻的规律。有文献指出，有效积温从850℃降为650℃，积温每减少一成，铃重减少一成；有效积温从650℃降为350℃，则成为无效桃，江苏省气象台根据近几年资料计算出铃重与有效积温之间的关系，见表7.17。

**表7.17 有效积温（≥10℃）与铃重**

| 开花后≥10℃有效积温 | ≥850 | ≥800 | ≥700 | ≥650 | <550 |
|---|---|---|---|---|---|
| 平均单铃重(克) | ≥5 | ≥4.5 | ≥4.0 | ≥3.5 | <3 |

2. 低温影响铃重的生理机制

农谚有"花见花，四十八"，指伏桃开花至吐絮需50天左右时间。随着开花期后延，开花到吐絮的时间就加长到60天或70天。这种因温度降低引起裂铃期后延的现象仅是外部形态表现，而其实质是低温影响棉纤维的正常发育。棉纤维由碳水化合物（纤维素）构成，当温度降至16℃以下时，纤维素基本上不形成。上海农业科学院1973和1974年曾对不同开花期棉铃壳进行糖、氮分析，其结果铃壳可溶性糖和全氮含量与开花期早晚成反比，即温度高时铃壳含糖量低，温度低时则含量高。因为铃壳含糖量高峰期虽出现在开花后15天左右，但早期棉铃处于温度较高的有利条件下，铃壳含糖量随棉铃增长而迅速下降，由单糖转化为纤维素，沉积在棉纤维内，铃重增加。后期棉铃，含糖量始终保持在较高水平，表明在温度较低情况下，虽然棉株氮素营养水平较高，长势正常，

但由于单糖转化成纤维素速度减慢，棉铃内较长时间保持较高含糖水平，铃轻晚熟，铃壳重量随开花期延迟而增加。

3. 影响铃重的温度指标

棉花纤维素合成需较高温度，纤维伸长期(开花后25—30天)温度不低于16℃，纤维充实期（开花后25—50天）需要20℃以上温度，否则纤维沉积加厚停滞。生育后期气温下降过猛，秋霜过早来临，使秋桃衣指骤降；胡竞良曾提出，“后期气温降到15℃以下，这时对棉铃生长和纤维成熟有很大影响。”江苏省气象台提出“气温下降到16℃以下，纤维素不能形成，由于热量不足，棉铃成熟度不高”。以上资料表明，棉花吐絮期生物学下限温度为15—16℃。

4. 秋雨影响烂铃

我国主要棉区每年进入8月以后烂铃相当普遍。黄河流域夏秋多雨年份的疫病和红腐病及长江流域的黑果病、炭疽病对产量影响很大，一般损失10—30%。

铃病发生与结铃吐絮期的气象条件密切相关，凡夏秋多雨、湿度大的条件均促使病菌传播。同时多雨之年，植株易旺长，在郁闭棉田条件下，高温、高湿亦易引起铃病大量发生。河北省1956年是多雨年，雨季降水量超过500毫米，发病率达20%，1957年8—9月降水量不足300毫米，发病率不到10%。湖北省有“三天霉，四天黑，三雨一晴一片黑”的农谚。1973年9月上、中旬，湖北省连续降雨10多天，雨量在100毫米以上，多点调查平均每株烂桃2—3个，重者5个以上。前华东农业科学研究所1958年棉花试验田烂桃率达44.2%，严重地块每亩收僵瓣花107斤。

各主要棉区根据本地区调查及试验资料曾提出一些烂铃的农业气象指标。如江苏省气象台根据近年资料提出如下指标，见表7.18。

近几年，一些棉区做了秋雨对烂铃影响程度的统计。如上海市气象科学研究所农业气象研究室得到如下结论：秋雨：（9月雨量）大于常年平均值140毫米，即会引起烂铃，造成危害，其影

表7.18　烂铃农业气象指标

| 日平均气温(℃) | 一次降雨天数 | 危害程度 | 烂桃率(%) | 重烂桃率(%)<br>单铃重<2克 |
|---|---|---|---|---|
| 15—17 | >3天或>2天中有一天降雨量在20毫米以上 | 轻 | 1—5 | <1 |
| 18—19 | ≥5 | 中 | 5—10 | 1—3 |
| >20 | ≥5 | 重 | 10—20 | 3—5 |

响程度可分为二级：9月雨量140—210毫米为多雨级，影响程度20%；大于210毫米（比常年多五成）为特多雨级，影响程度30%。

湖北省气象局农业气候区划办公室通过对湖北省天门棉区棉花的农业气候因子分析，提出秋雨影响烂铃，不仅要考虑9月雨量，也要考虑10月雨量。当9月雨量大于或等于110毫米，为多雨级，影响程度为20%；10月份雨量大于100毫米，亦为多雨级，影响程度为10%。

防止烂铃措施：（1）整枝，消除植株徒长的内在条件，也减少一部分生理上不需要的枝叶，使棉株生长正常，有利于改善棉田小气候，增强棉株抵抗力，减少烂铃发生。（2）培土、开沟、排水。培土是防烂铃的重要措施，便于排泄雨水，加大地表蒸发面积，减少地表水分，有减少烂铃效果。开沟排水，降低地下水位，防止棉田过于潮湿，可减少烂铃。根据湖北新洲调查，地下水0.8米，烂桃率为22.3%；地下水1米，烂桃率为10.8%；地下水1.25米，烂桃率仅为6.7%。其次，雨后排水良好的棉田烂桃率低。（3）促进早熟，防止病虫危害及机械损伤。

## §4　油菜气象

### 一、油菜对温度和光照的反应

#### （一）春化作用

油菜必须通过一定的温度条件才能现蕾、抽苔、开花、结实。目前已经明确，油菜的春化作用是在长柄叶形成时期进行的，此后油菜才能抽生短柄叶和无柄叶，开始花芽分化。

我国不同类型、不同品种的油菜，感温特性各不相同，据此可将它们分为三种类型：

（1）冬型　一般为晚熟或中晚熟品种，它们对低温的要求较严格，需要0—5℃的温度条件，经15—30天以上才能通过春化阶段。如果没有这样的条件，就要延迟现蕾、抽苔、开花或长期停留在苗期阶段。

（2）半冬型　一般为中熟和早中熟品种，它们对低温的要求不很严格，如秋季提早播种，大部分植株当年可由营养生长转入生殖生长，因而许多半冬性品种即可在冬油菜区进行秋播，又可在春油菜区进行春播。

（3）春型　一般为极早熟、早熟及部分早中熟品种。它们在5—15℃的温度下，经过15天左右就能通过春化阶段。这类品种在春季播种一般都能正常开花结实。在秋季播种，当年冬季甚至冬前就会普遍发生早苔早花现象。

（二）光周期现象

油菜通过春化阶段后，还需经过“光照阶段”，才能开花结实。影响油菜通过“光照阶段”的主要因素是光照长度的长短。增加光照时数，能提早现蕾开花，减少光照时数，则会延迟现蕾开花。但它对光照的要求不象对温度要求那么严格。油菜的花芽分化与光照长短无关，但花芽分化后的进一步发育，则受光照的制约。长日照可以加强生殖生长。促进抽苔与花芽的进一步分化。反之，短日照则会延缓抽苔与花芽的进一步分化。

油菜长期栽培在极广泛的地区，品种类型多种多样，因此对温度和光照的适应性范围较大。一般而言，北方的冬油菜冬性强，对光照比较敏感，对低温长日照条件的要求比较明显。而南方的冬油菜春性强，对光照不敏感，对温度和光照的适应性较强。

（三）油菜温光特性在生产上的意义

第一，根据油菜品种类型、生育期等特性，各地应选用适应本地气候特点的品种，并确定适宜播种期。冬性品种生育期长、丰产性能好，耐寒性强，适宜于两熟制地区栽培。在适当早播情况下，一般不会提早现蕾、开花，有利于发挥其高产特性。春性品种生育期短，单株生产性能较差，抗寒能力也较弱，适宜于三熟制地区栽培，在合理密植和加强管理的情况下也可获得高产。春性品种苗期生长快，易早抽苔开花，故播种不宜过早。

第二，南、北方气候条件不同，因各品种的特性各异，相互引种中需加注意。北方油菜冬性强，引种到南方后，发育推迟。南方的冬油菜特别是早熟品种，春性强，向北方引种如作冬油菜，若早播会发生早苔早花现象，若晚播，则易在冬季遭受冻害。我国冬油菜主要产区，即长江中下游各省的主要品种一般可互相引种，而华南、西南春性较强的品种则不宜引到长江中下游种植，西南地区的半冬性品种则可引入长江中下游和华南各省。

（四）生育期随地区、播种季节和年份的变化

油菜生育期的长短既与其品种特性有关，又与栽培条件有关，还与栽培地的自然条件（主要是气候条件）有关。

就品种类型而言，白菜型生育期较短，甘蓝型较长，芥菜型介乎二者之间。

油菜生育期的长短在地区分布上有着明显的变化规律。我国长江流域是主要油菜产区，一般由西部至东部生育期逐渐延长。例如白菜型品种在西部全生育期为160天左右，东部则为200天左右；甘蓝型品种胜利油菜早熟品系322天，在成都全生育期约196天，武汉约206天，上海则为233天，在纬向分布上，随着纬度的升高，油菜全生育期逐渐变长。随着海拔不同，油菜品种的生育期也相应地呈有规律的变化。如在云贵高原，油菜的生育期随海拔增高而延长的趋势非常明显。

油菜全生育期的长短随播种期的推迟而缩短。胜利油菜在夏

播条件下（9月1日以前播种），由于待秋季温度下降后才能通过感温阶段，第二年才现蕾、开花，全生育期长达240天以上，而在秋季至早春播种的条件下（9月21日至次年2月11日），随播种期推迟，生育期明显缩短，最短仅99天。

同一地区，油菜全生育期的年际变化比较小。据镇江市农业气象研究所（1980—1985）连续5年对甘蓝型早中熟品种宁油7号的试验结果，在每年播种期相同的情况下，全生育期天数的年平均值极差为7.7天，变异系数仅1.13%。可见在同一地区，在相同播种期种植同一品种，历年成熟期大致相近。

### （五）植株性状和产量构成的季节和年际差异

在秋播条件下，油菜植株的主要性状随播种季节的推迟而变化。密度相近时，随着播种期的推迟，株高变矮、茎粗变小，一次分枝数减少，其中茎粗的变化最大。

植株性状的年际差异也比较明显，其中茎粗的变异系数达8.1%，株高的年度平均值之间极差达50.1厘米，一次有效分枝数则相对地差异小些。

油菜产量构成因素中，单株有效角果数随播种期推迟而减少，每角粒数亦随播种期推迟而减少，千粒重则无明显的变化规律。

油菜种子的含油量是其品质好坏的主要指标之一。不同纬度的自然条件对油菜油分的形成有显著的影响。据湖北省油料研究所（1973—1975）测定，油菜籽含油量随纬度的降低而下降。从一些纬度较高的国家如加拿大、英国、法国引进的甘蓝型油菜品种，在武汉种植后，含油量显著降低。如法国品种“梅桃”（Major）在原产地含油量为50.63%，在武汉地区下降为33.36%；加拿大品种“齐菲”在原产地含油量为51.44%，在武汉地区下降为37.84%。

## 二、油菜生长发育的气象条件

### （一）苗期

油菜播种以后，田间出苗情况主要受土壤温度和湿度等条件

的影响。一般日平均气温在3℃以上，种子吸水达自身重量的60%以上时，即可萌动发芽，但根芽生长速度极为缓慢，出苗需20天以上；8℃左右时约需10天以上，12℃左右时7—8天，16—20℃时出苗只需3—5天。土壤湿度（占田间持水量）在50—60%时，气温越高，出苗所需天数越少。土壤湿度过高或过低对出苗都不利。

油菜苗期的长短因品种、播种期和种植地的气象条件等不同而异。一般冬性强的品种苗期较长，春性强的品种苗期较短，半冬性品种介于两者之间。同一品种播种期不同，苗期长短也不一致。据中国农业科学院油料作物研究所试验（1961），胜利油菜在周年播种的情况下，苗期最短仅50余天，最长达200天以上，一般早播的苗期长，迟播的苗期短。在一定播种期范围内，相同品种类型油菜的苗期的总积温比较稳定，冬性强的品种约需600—900℃，半冬性品种约需300—700℃，春性强的品种约需300—500℃。

油菜苗期是它的营养器官生长期，其生长中心是叶片与根系。苗前期（出苗到花芽分化）地上部分较地下部分生长旺盛，地上部分主要是叶片数目的增加与叶面积的扩大。新叶的生长，在五叶期以前一般以第一、二、四叶的出叶速度较快，第三、五叶较慢，每出生一张叶片所需时间，受气温、品种类型等条件的影响很大，其出叶速度随气温的升高而加快。油菜叶面积的增长速度受温度的影响也较大，温度较高时，叶面积增长的速度也快些。

在品种类型方面，一般白菜型油菜的出叶速度和叶面积增长都较甘蓝型油菜快，春性强的品种叶面积增长比冬性品种快，在较低温度条件下，春性强的品种出叶速度较冬性品种快。

（二）蕾苔期

油菜自现蕾至初花期的生育时期称为蕾苔期。蕾苔长短受品种、温度、播种期等因素的影响较大，一般春性品种蕾苔期较长，半冬性品种次之，冬性品种较短。冬油菜蕾苔期较长，约30天左

右，春油菜较短，仅15天左右甚至更短。一般白菜型和芥菜型早熟品种早播的，由于受秋季较高温度的影响，会过早现蕾，蕾苔期缩短，而晚熟品种早播的蕾苔期要长于迟播的，蕾苔期温度高，所经历的时间较短，一般此时期 温 度 在 12℃左右较宜。气温高于12℃时，蕾苔期将明显缩短。

油菜在蕾苔期进行营养生长的同时，还在迅速进行花芽分化。花芽分化的早迟与播种期关系较大，无论是冬油菜，还是春油菜，早播的花芽分化也早。花芽分化的速度与品种、营养条件有关，还与温度等因素有关。据华中农学院（1973）观察，冬前由于气温高，主花序每天分化花芽0.5—2.0个，1月中旬到2月中旬气温低，每天只分化0.5个以下，开春后气温回升，每天分化花芽多达1—3个。可见暖冬年花芽分化数要多于冷冬年。

蕾苔后期一次分枝在茎上陆续出现，一次分枝的多少与播种期早迟有关。一般早播的苗期长，主茎总叶片数多，腋芽抽生早而多，分枝节位下降，有效分枝显著增多。

（三）开花期

油菜开花期的长短随品种特性和气温高低、空气湿度等因素而异。中迟熟类型的品种花期较集中，开花日数少，开花期约30天左右，早熟品种花期长，约40—55天左右；少数年前抽苔开花的花期更长。影响油菜开花的外界环境因素，以温度最为显著。其开花适宜温度一般在14—18℃左右，早熟和早中熟品种偏低，中迟熟品种偏高。当天的开花数与开花前1—2天的气温有关，气温降到10℃以下，开花数显著减少，5℃以下一般不开花，短时间0℃左右的温度对正在开放的花朵和幼角不会产生严重影响。据上海市农业科学院(1972)对“23号”油菜品种的观察，在－1℃条件下开的花经24小时后气温转为正常，其结角率尚有69.5%，其中抗寒力最强的个体结角率仍达91.7%以上。但在低温持续较长的情况下，在5℃左右也会出现花而不实现象。此外，空气相对湿度的高低对开花也有一定的影响，一般以相对湿度70—85%

较为适宜，过高或过低均不利于油菜开花。

油菜每株植株形成的蕾花数很多，但它的有效角果数仅占总花蕾数40—70%左右，不结实角果（荫角）占10—20%，脱落数20—40%，蕾果脱落与无效角果所占比重较大。这也是油菜生产的潜力所在。影响油菜结角率除生理、营养、病虫害、种植密度等原因外，气候的影响是主要原因之一。低温包括低温强度、降温幅度和低温持续时间对结角率有很大影响。据控制低温下花粉发芽实验结果，如把17—18℃条件下将花粉处理20小时后的发芽率作为100，则在6℃条件下处理5小时的发芽率为47.9，处理20小时的为26.0，处理30小时的为21.9。可见低温影响下油菜花粉发芽率显著降低，因而受精作用不能正常进行，导致脱落率增加。高温对结角率也有影响，高温使花器官发育失常，造成花蕾脱落。相对湿度是影响结角率的最主要的气象原因，相对湿度达98%时，结角率显著下降，湿度越高，结角率越低，花时降水影响更大。相对湿度低于60%也对结角不利。

（四）角果发育成熟期

油菜角果发育成熟期指终花期到成熟期的日数。据中国农业科学院油料作物研究所观察，甘蓝型的早中熟品种这一时期需要22—35天，一般27天左右；白菜型中迟熟品种为23—31天，一般26天左右。其长短与品种、气象条件有较大关系。

角果发育成熟的适宜温度在18—20℃之间，日平均气温低于9℃或高于25℃都不利于角果发育成熟，易造成秕粒甚至角果脱落。光照强度和湿度对角果发育成熟也有影响，如阴雨天数多，会因光照不足，湿度大，而使植株出现贪青迟熟现象；也易感染病害，使籽粒重量和产品品质降低。如出现高温干旱天气，则会发生高温逼熟现象，秕粒增多，菜籽含油量降低。

**三、油菜产量形成的气象条件**

（一）产量构成与气象

油菜的有效分枝是构成其产量的重要因素。据镇江市农业气

象研究所（1980—1985）研究，甘蓝型油菜宁油7号一次有效分枝数与理论产量呈极显著正相关（r = 0.7373***[1]，n = 24），其上着生的有效角果数占全株有效角果数的65.7%，而二次有效分枝数与理论产量相关不显著(r = 0.3317，n = 24)，其上着生的有效角果数仅占全株的17.8%。油菜有效分枝的多少除了与油菜类型、品种特性、营养状况、种植密度、肥料运筹等因素有关外，还与苗期温度高低有关。据研究（镇江市农业气象研究所1978—1981），现蕾期主茎叶龄(主要是宿茎叶)与一次有效分枝数呈正相关（r = 0.7704***，n = 14），现蕾期主茎叶龄大约每增加4.8张即可增加一个有效分枝。由于苗期主茎叶龄增长速度与同期平均气温有关（r = 0.6682**，n = 115），所以苗期总积温与现蕾期主茎叶龄亦存在极显著相关（r = 0.8962***，n = 14），因而适期早播的一次有效分枝数一般多于迟播的。油菜植株着生角果的多少既与花芽分化的多少有关，也与结实率的大小有关，花芽分化期和开花结荚期的气象条件对单株有效角果数有着明显的影响，其中，单株有效角果数与现蕾期前60天总积温成正相关，与开花期空气湿度呈负相关，并有下式成立：

$$y = 210.42 + 1.508\frac{N \cdot \Sigma \overline{T}}{\Sigma \Delta U} \quad (n = 14, r = 0.7239^{**})$$

式中，N为现蕾期主茎叶龄，$\Sigma \overline{T}$为现蕾前60天总积温，$\Sigma\Delta U$为累积高湿危害量（指开花期日平均相对湿度与80%之差的累积值，差值小于等于0时作0计算）。

油菜每荚胚珠约有30—40个，但结籽的仅10—20粒，结籽率较低。其每角总粒数与开花期前后的气象条件有关。据镇江市农业气象研究所（1981—1983）研究，每角总粒数与开花日到其后7天内的平均温度正相关（r = 0.4099**，n = 117），与开花前5天到

1）**表示显著相关；***表示极显著相关，以下同。

开花后一天的日照时数呈正相关($r=0.6088^{***}, n=117$)，与开花前6天到开花后一天的平均相对湿度负相关 ($r=-0.5539^{***}, n=117$) 。

油菜籽粒重在品种类型方面差异很大，同一品种的粒重受籽粒形成时期的气象条件影响较大。高原地区由于油菜籽粒形成时期光照强，昼夜温差大，千粒重明显高于平原地区，且有随海拔增高粒重增加的趋势。在长江下游地区，甘蓝型油菜早中熟品种开花早，籽粒增长期间温度相对低些，籽粒增长持续时间较长，对增加粒重有利；而晚熟品种开花迟，籽粒增长期间温度较高，成熟提早，一般粒重较低，如遭高温逼熟，则籽粒更小

（二）产品品质与气象

油菜产品品质主要指含油量、油的成分(主要是脂肪酸含量)以及菜籽饼的成分(主要是硫化物含量及蛋白质含量)。据中国农业科学院油料作物研究所统计分析，我国现有甘蓝型油菜品种的平均含油量为41.72%，“青油6号”含油量最高，达46.92%，“宁油3号”最低，仅36.50%。国外甘蓝型油菜品种的含油量以加拿大的“齐菲”和“米达斯”最高，为51%左右。我国白菜型油菜品种的平均含油量为39.73%，以西藏农家品种“隆子”最高，为51.60%，河南农家品种“栾川油菜”最低，仅28.43%。国外白菜型油菜品种的含油量以加拿大的“托启”较高，为49.43%。我国芥菜型油菜品种的平均含油量为39.12%，以云南农家品种“盘溪大寨油菜”的含油量最高，为49.09%，新疆野生种“昭苏野油菜”最低，仅21.81%。环境条件对油菜籽含油量有明显的影响，在角果发育阶段天气晴朗，光照充足，日夜温差大，土壤湿润，磷肥充足，油菜叶片、茎皮和角果皮等绿色部分可以充分进行光合作用，制造较多的营养物质并转化成油分，种子含油量较高。反之则较低。

从食用角度看，菜籽油品质以亚油酸含量高，芥酸含量低为好。克莱格(Craig)发现，生长在凉爽北部地区的油菜比生长在干

燥温暖地区的油菜芥酸含量高。康丰纳（Canvia）（1965（研究指出，在高温下成熟的油菜芥酸含量较低，油酸含量较高；而在低温下成熟的芥酸含量增加，油酸含量减少。李正日（1975）的研究也得到类似的结论。在日本和南朝鲜的四个地方栽培油菜，以及在栽培季节变化的条件下收获的油菜籽，除油酸以外的脂肪酸含量，特别是芥酸含量与当地开花至成熟期的平均气温呈显著的负相关。

## 四、油菜气象灾害

### （一）冻害

我国南方各省，特别是长江中下游地区，由于受北方强冷空气影响，冬季常遭到寒潮的袭击，早春则受到晚霜冻的危害，造成油菜冻害。油菜冻害根据受冻部位的不同，一般可分为根拔（也叫提苗或掀苗）、叶部受冻和蕾苔受冻三种。

一般当气温下降到－5℃以下时，土壤夜间结冰，体积膨大，地表土层掀起，油菜随着土层上抬，根系被拔断。白天气温升高，冻土又融化下沉，几经反复冻融，油菜根部外露受冻或倒地而被冻死。晚播迟栽油菜苗小瘦弱，叶片少，根系差，如耕作粗放，排水不畅，田间渍水较多，移栽质量差，很容易发生这种现象。

叶部受冻是油菜最常见的一种冻害，主要有三种表现。第一种是叶片僵化。由于叶片直接受低温影响，清晨细胞间隙水和细胞内自由水冻结，叶片全部僵化呈油绿色，变得脆而易断，到中午前后气温升高，解冻融化后的水分被缓慢吸收，僵化叶片逐渐变软而复原。如果温度继续下降或低温持续时间较长，冰冻严重，解冻时气温又比较高时，由于融化迅速，细胞来不及吸收失去的水分便死亡，菜叶呈冻伤状，或全部发白枯死。第二种是叶片皱缩。由于叶背表皮不能随着增大，因而叶片皱缩，严重时表皮破裂。这种冻害一般不能复原，多发生在早春冷空气侵袭时。第三种是叶片发紫。由于低温影响，根系吸收能力减弱，引起生理缺肥，花青素大量显现，叶片呈紫红色。

气温下降到－4—－3℃时，叶部冻害就可能发生，温度越低冻害越重，气温在－8—－7℃时，冻害比较严重。叶部冻害现象在偏施氮肥、苗期阴雨天较多，播种密度过大，以致造成冬前徒长，植株叶片组织柔嫩时，较易发生并且较严重。植株外缘绿叶的细胞质浓度比叶心低，所以外缘叶常易受冻，并且冻害程度普遍重于心叶。当然，冻害严重时心叶也会受冻。

油菜进入蕾苔期后，抗寒能力减弱，遇到0℃以下低温，就可能遭受冻害。冻害较轻时幼蕾受冻呈黄红色，正在开放的花朵因低温而不结实，花蕾大量脱落，出现分段结实现象。冻害较重时，苔茎受冻，皮层破裂，萎缩下垂，严重时折断或凋萎枯死。

蕾苔受冻可发生在冷季，也可在早春。一般春性较强的早熟和早中熟品种，在早播或秋冬气温较高的情况下，过早现蕾抽苔，并出现早花现象，就容易遭受冬季蕾苔冻害，冬性较强的品种受冬季蕾苔冻害比较少。晚霜冻出现时，不管是春性品种还是冬性品种，只要是处于抽苔开花时期的，都可能受到蕾苔冻害。

油菜冻害的发生及严重程度与品种、植株状况，发生冻害时所处发育时期、栽培措施、土壤湿度、冻害前的天气，冷空气侵袭类型、降温幅度、低温强度、低温持续时间以及冷空气影响后的升温过程等都有关系。

油菜冻害可以通过栽培管理措施减轻或防止。首先，选择适合的品种特性确定适当的播种期，注意稀播，培育壮苗，增强秧苗的抗逆能力。油菜品种的选择除了考虑它的丰产性外，还应注意它对当地气候的适应性。这一点，可以通过对油菜品种进行的气候适应性鉴定来解决。播种期的确定也可以通过专门的农业气象试验或分析解决。第二，适时早栽，保证移栽质量，施足基肥，重施腊肥，越冬前松土壅根，保证壮苗越冬。腊肥有较好的防冻效果，特别是有机堆肥，群众就有“冬上一层泥，好比三冬盖棉被”、“千浇万浇，不如腊肥一浇”的说法。磷、钾肥能增强植株抗寒能力，苗期中应适当增施。第三，清沟排涝，降低地下水

位；在干旱时要及时抗旱，也可结合抗旱浇施稀粪水。第四，实行覆盖。在行间覆盖枯秆、谷壳，水草等，或在寒潮、晚霜冻前在田间撒施薄层谷壳或草木灰等。第五，在越冬期间对早抽苔开花的植株及早摘苔。摘苔宜在晴天进行，切忌在雨雪天，以防伤口腐烂。摘苔后要追施一次速效肥料,使植株体内养分得到补偿，促使增发分枝，增产果实。

（二）旱害和渍害

油菜对水分条件的要求因品种不同而异，不同品种耐受干旱或渍害的能力亦有差别。就品种而言，白菜型耐旱性弱，芥菜型较强,尤以西南高原地区原产的芥菜类型旱生型的耐旱性最强,甘蓝型则介于两者之间。油菜不同生育期对土壤湿度的要求也不同。油菜苗期缺水，不利于培育壮苗，还会出现红叶和早花现象；蕾苔期是油菜一生中对水份反应最为敏感的临界期。角果发育期，土壤湿度也不能太低。

我国南方油菜产区，秋冬干旱比较普遍，有些地方还比较严重，必须采取抗旱措施。抗旱可采用沟灌、浇水、喷灌等办法，可根据天气情况、干旱程度、苗情等情况灵活掌握。

油菜一生虽需水较多，但一般品种多不耐渍，白菜型品种渍害更重。我国油菜产区土壤多以水稻土为主，田间易造成渍害。若春季雨水多，土壤和空气湿度大，还易诱发病害。因此，应重视田块沟系配套，冬前和开春后注意清理沟渠。

## 参 考 文 献

〔1〕丁颖主编，中国水稻栽培学，农业出版社，（1961）。
〔2〕黄祥辉等编著，小麦栽培生理，上海科技出版社，（1984）。
〔3〕北京农业大学，农业气象学，科学出版社，（1982）。
〔4〕四川农业科学院主编，中国油菜栽培学，农业出版社，（1964）。
〔5〕傅寿仲等编著，油菜的形态与生理，江苏科技出版社，（1983）。
〔6〕唐耀升，棉铃生育与温度研究初报，棉花，（4），(1930)。
〔7〕张雄伟等，黄河流域棉区棉田耗水量与合理灌溉技术的研究，棉花，（2），

(1980)。
〔8〕水稻光温生态研究协作组编著，中国水稻品种光温生态，科学出版社，(1978)。
〔9〕梁光商主编，水稻生态学，农业出版社，(1983)。
〔10〕国际水稻研究所编，气候与水稻，(中国农业科学院农业气象室译)，农业出版社，(1982)。
〔11〕陶炳炎等编著，杂交水稻与气象，江苏科学技术出版社，(1983)。
〔12〕高亮之等，中国不同类型水稻生育期的气象生态模式及其应用，农业气象，(2)，(1982)。
〔13〕江苏省杂交水稻气象问题研究协作组，温光条件与水稻叶片生长和干物质增长的关系，作物学报，Vol.9，No.2，(1983)。
〔14〕李林等，杂交稻适宜季节的气象生态研究，江苏农业科技，(2)，(1980)。
〔15〕颜振德，杂交水稻高产群体的干物质生产与分配的研究，作物学报，Vol.17，(1981)。
〔16〕郑大玮等编著，冬小麦冻害及其防御，气象出版社，(1985)。
〔17〕北方小麦干热风科研协作组，小麦干热风，气象出版社，(1988)。
〔18〕龚绍先主编，粮食作物与气象，北京农业大学出版社，(1988)。
〔19〕潘铁夫等著，农作物低温冷害及其防御，农业出版社，(1983)。

# 第八章 林业气象

我国森林资源在历史上是丰富的。但现在我国森林覆盖率却很低，只有约12.7%，大大低于世界平均水平（20—23%）。森林分布也不均匀，覆盖率超过30%的仅黑龙江、吉林、浙江、福建、江西、湖南、广东、台湾8个省；而在10%以下的则有西北、华北、青藏广大地区以及江苏、天津、上海等11个省市区；新疆、青海、宁夏且不到1%。一般认为，森林覆盖率应在30%以上，分布均匀，才能起到维护与发展生态平衡的作用。因此保护好现有森林，大搞速生丰产林，建设新的商品林基地，经营好生产性森林，实行永续利用，最后实现大地园林化，把森林覆盖率提高到30%以上，是全国人民一项建设社会主义，造福子孙后代的宏伟奋斗目标。

森林对人类来说，它的直接效益是生产木材（用材林）和其副产品；生长只有在森林中才有的一些动植物；还可作薪炭林、经济林等。但森林之所以能维护与发展生态平衡却在于它的间接效益。森林可以调节和改造气候，防御农业气象灾害，改善农业生产条件；保持土壤、防风固沙，防治干旱化与沙漠化；保蓄水分，防止水土流失，“造林就是造水”；净化空气，减少和防治污染；减少燥音，保护和美化自然环境以及影响全球水分循环、热量平衡和$CO_2$收支等。这些效益的综合便起到保护与发展生态平衡的作用，并促进农业的巩固与发展，这些效益中不少内容与林业气象密切相关，甚至就是林业气象工作。

林业气象是研究森林群落中的气象场结构和特征以及这种气象场对其周围大气场的影响范围和强度的。当然，气象因子对于森林也是有作用的，如气象条件的变化对森林育苗、营林、采

伐、更新以及森林群体的生理生态等都会产生不同的影响。

研究林业生产与气象条件的相互关系及其规律的科学是林业气象学。其目的是在揭示林业生产与气象条件相互关系及其规律并根据维护生态平衡和林业发展的需要，运用气象和林业科学技术，既利用和开发自然环境（包括气候环境），又利用和改造生物体本身，形成自然环境-生物-人类活动的良性循环系统，不断发展生态平衡，同时使人类又持续地获得他们所需要的生产、生活用品。

气候是影响森林地理分布的主要因素。气候条件中，又以温度与降水最为重要。我国的地理特点使气候的地带性明显，因此我国森林从宏观上看，地带性也明显。从≥10℃积温考虑我国气候可分为10带，其相应的森林带见表8.1。

## §1 树木、森林生长发育与气象条件

### 一、太阳辐射与林木、森林

（一）太阳辐射对林木生长发育的影响

光长、光强以及光质都对树木和森林的生长发育产生影响。它们的影响与太阳辐射对农作物的影响以及一些概念如光周期现象、群体的光合产量、光的补偿点与饱和点、太阳能利用率等在内涵上基本一致。

在北半球生长季节，南方光长短于北方，南方大多为短日照树木，北方多为长日照树木。但有些品种经过异地的长期驯化，会在一定程度上丧失对光长的敏感性。不同树种对光长的要求不同。开花与光周期同步的树种只能定居在完成生活史最有效的纬度范围。

光强对林木生长发育有很大意义。不同树种对光强要求不同，同一树种，不同生长发育时期也不同，并随树木年龄增大而增强。在其他条件适宜时，光合强度随光强而增强，但也存在有光的补偿点与光的饱和点。不同树种要求最适的光强不同。有些树种要

表8.1 我国气候

| 序号 | 气候带 | ≥10℃积温（及其天数） |
|---|---|---|
| Ⅰ | 北温带 | <1600—1700（<100） |
| Ⅱ | 中温带 | 1600—1700至<br>3100—3400（100—160） |
| Ⅲ | 南温带 | 3100—3400至<br>4250—4500（160—220） |
| Ⅳ | 北亚热带 | 4250—4500至<br>5000—5300（220—240） |
| Ⅴ | 中亚热带 | 5000—5300至6500（240—300）<br>云南地区5000—5300至6000（240—300） |
| Ⅵ | 南亚热带 | 6500—8000（300—365）<br>云南地区6500—7500（300—350） |
| Ⅶ | 北热带 | 8000—9000（365）<br>云南地区>7500（350—365） |
| Ⅷ | 中热带 | 9000—10000（365） |
| Ⅸ | 南热带 | >10000（365） |
| Ⅹ | 青藏高寒区 | <2000（<100） |

* 有些生态学书中，气候带与相应的林带和本表不全一致。本表气候带划分，

求在全光照或较强光照下生长如山杨、白桦、马尾松、杨属、柳属、刺槐等称为喜光植物，也称阳生植物。也有一些树种要求在一定的庇荫条件下生长如云杉、冷杉、甜槠、建柏、竹柏等称为阴生植物。它们决定于补偿点的高低。介于喜光植物与阴生植物之间的称为中性树种，一般在幼苗期较耐庇荫，随着树龄的增长，逐渐表现出不同程度偏阳的特性如红松、椴树、杉木、毛竹、侧

带和林带*

| 相应的林带 | 主要分布地区 | 主要树种 |
|---|---|---|
| Ⅰ寒温带针叶林（常绿落叶针叶林） | 大兴安岭山地 | 兴安落叶松 |
| Ⅱ温带针叶落叶阔叶混交林 | 大兴安岭、张广才岭、完达山及长白山地 | 红松 |
| Ⅲ暖温带落叶阔叶林 | 辽宁、河北、山西、山东、陕西、甘肃等省山脉 | 油松、华山松、马尾松、桦树落叶阔叶 |
| Ⅳ北亚热带常绿阔叶混交林 | 秦岭、小陇山、武当山、伏牛山、大别山、天目山、黄山等 | 混交林、松栎混交林 |
| Ⅴ中南亚热带常绿阔叶林 | 武夷山、南岭山地 | 马尾松、杉木常绿阔叶林中心分布区 |
| Ⅵ南亚热带、热带季雨林雨林带 | 台湾东部山地、海南中部滇南及两广沿海低山丘陵 | 栎科、樟科、大戟科、茜草科等 |
| | | |
| 林木稀少，某些高河谷有小片桧柏或云杉林<br>Ⅶ青藏高原东缘高山针叶林　Ⅷ以云杉属为主 | 西部河流上游中高山区山地 | 以耐寒针叶林为主 |

* 严格说，除Ⅹ区处，只限于东部季风区。

柏、榕树等。这三类树种在外部形态、解剖结构、生长发育和生理作用方面都有差别。树种的耐荫能力林业上称为耐荫性。树种不同，耐荫性不同，同一树种不同树龄也不一样。一般幼小树木比较耐荫，随着树龄的增长需光量逐渐增大，开始结实时需光最多。

光强对树木形态的影响，如空旷地的稀疏树木，树干粗矮，

树冠庞大；而在光强较弱的密林中，树干往往细长，树冠狭窄。

光强也影响林内地被种类、数量和林木的天然更新。林内多层叶片相重，对光照利用更为充分。群落下层阴生植物对这种光照有很强的适应力，通常在相对光强为5—20%时仍能生长良好，1—2%的相对光强被认为是维管束植物生存的下限，但某些藻菌植物在相对光强为0.5%甚至0.1%时也能生存。和林外比，林内地表光强为空旷地0.6%以下时，草本植物不能生长，要在光强2—3%时才能生长良好。

同种植物不同植株生长在阴地和阳地上，它们形态结构和生理特性也会有差异。同株植物因叶子着生部位不同，受光有强弱而形成阳生叶和阴生叶。群落上层或树冠外层的叶受光较多，多为阳生叶，一般叶面积小，叶子厚；下层多为阴生叶，叶面较大较薄，阴生叶常因光强不足而致死；有时阴生叶骤然暴露在强光下（如采伐后），也往往难以存活；树木能否成活，需以生长一批在解剖构造上能否适应新环境的新生叶而定。

光的来向也产生影响。单方向的光可引起树木发育不平衡。向光面的枝条粗壮茂盛，背光面的细弱稀疏，有时还可导致树干偏斜，髓心不正，对松树和刺槐，表现特别明显。

在光合有效辐射的光谱范围内，不同光谱对光合作用的影响并不尽同，第二章已有论述。但有人认为，这种差异只在光强较弱时才会出现。也有人认为，在自然界光质不同对光合作用没有直接影响，看来这个问题有待深入研究。

（二）森林对太阳辐射的影响

森林内光强及其分布的特点，概括起来就是光长缩短，光强减弱，光质有变化。树冠下光照条件与旷地相比有显著不同。这种特点对林木种类、生长速度、成材期和木材质量以及森林的永续性都有影响。

叶片和叶层对光的反射、吸收和透射，已在第二章有所论述，各自所占比例，除受光的性质影响外，还决定于叶片性质、年

龄、结构、叶面积大小、着生部位与轴的夹角，也与其他气象条件如有无风、风大小、天气状况等有关，还与植物种类、生长发育时期以及季节、一天的不同时期有关。

林内光照强度明显弱于林外。不同种类组合、不同结构与郁闭度、不同植物群落以及不同季节和外部环境，林内光照强弱情况不同。从树冠到林内地面的减弱程度则主要决定于叶的密度和叶片的排列。假定成层的叶片是匀质的，光强的减弱可按（8.1）式计算：

$$I(F)=I_0e^{-KF} \tag{8.1}$$

式中，$I_0$为树冠的光强，K为群体叶层的光衰减系数，F为各层次以上叶面积之和。据此得出郁闭林冠和叶子密集的乔木群落，光照减弱等于或大于阔叶型草本群落；树冠稀疏或乔木树种组成的稀疏群落，光照减弱通常与禾草群落型相似。

不同季节，林内光强变化也很大。这是由于叶片数量因植物生活周期而变化所致，因此林内光强也随季节而变化。变化状况以落叶林和草本群落为最显著，从图8.1的不同群落内光强的季节变化可以说明。

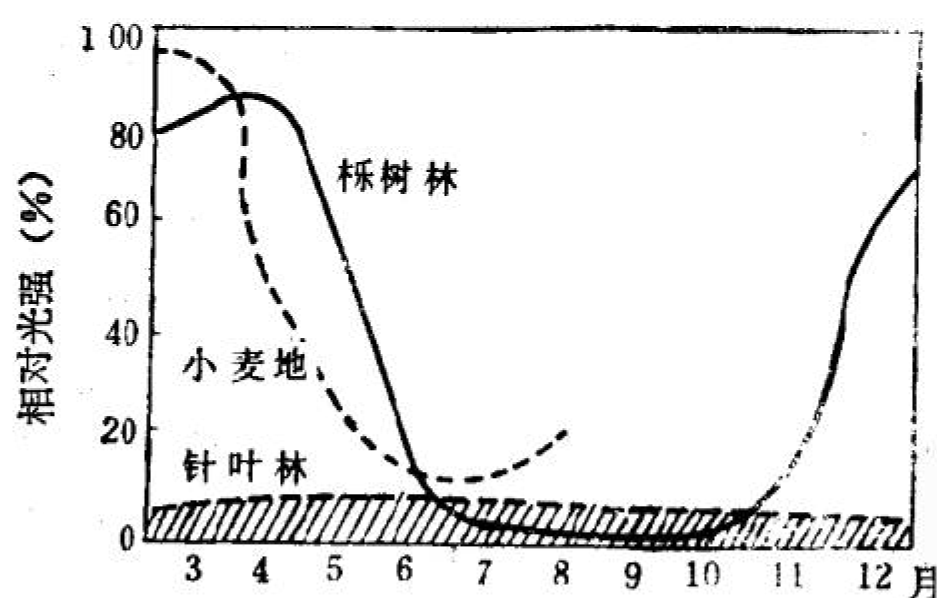



图8.1 不同群落内光强的季节变化
（赵儒林，1983）

实际上，林内植物对光照的季节变化是有适应能力的。例如落叶林下的幼年乔木，叶片脱落往往迟于成年乔木；常绿林下因

全年光强都很低，林下生长的主要是隐花植物。

林内主要以散射光为主，有少量直射光透过，在林下形成光斑。林内光谱特性也有不同，表8.2是在小兴安岭林区红旗林场落叶松林内观测的资料。可以看出不同光谱对林内反射、透射和吸收的不同情况。

**表8.2 落叶松林内的光谱特性**

| 波长（单位nm） | 红（668） | 橙（609） | 黄（559） | 绿（505） | 蓝（455） |
|---|---|---|---|---|---|
| 反射率(%) | 1.8 | 3.5 | 2.7 | 2.3 | 2.2 |
| 透射率(%) | 15.5 | 12.7 | 26.2 | 31.8 | 20.4 |
| 吸收率(%) | 82.7 | 83.8 | 71.0 | 65.9 | 77.4 |

（贺庆堂等，1980）

（三）森林辐射平衡

森林辐射平衡是指到达森林作用面的太阳辐射和森林作用面的长波辐射之间的收支状况，它反映了森林作用面和大气之间能量交换的相互关系。可用第三章辐射平衡方程稍作修改表示：

$$R=(S+D)(1-\alpha-\beta)-F \quad (8.2)$$

式中，S，D，F含义同第三章，$\alpha$和$\beta$为森林作用面的反射率和透射率。

实际上，森林有几个作用面，林冠是其中最主要的，还有林地、灌木层和草本层作用面。通常所称的森林作用面，应指各作用面的总和，是将森林作为一个整体而不分层次的。

表8.3是林内外地表辐射平衡各分量的比值，是在海南岛人工栽培的热带经济阔叶林中测定的，可看出林冠对于辐射平衡各分量施加的影响。

辐射平衡各分量占总辐射的比例，林内外略有不同。直接辐射林内小于林外，散射辐射则反之。表8.4的资料说明了这点。

（四）光能利用和森林生产力

表8.3 林内外地表辐射平衡各分量的比值

| 时间 | 白天 | | | | | 夜晚 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 项目 | 直接辐射 | 散射辐射 | 总辐射 | 反射辐射 | 长波辐射 | 辐射差额 | 辐射差额（长波辐射） |
| 比值（%） | 13 | 17 | 15 | 13 | 21 | 11 | 22 |

（卢其尧，1964）

表8.4 辐射平衡各分量占总辐射的比值

| 比值（%） 项目 / 地段 | 直接辐射 | 散射辐射 | 总辐射 | 反射辐射 | 长波辐射 | 辐射差额 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 林内地表 | 51 | 49 | 100 | −18 | −47 | 35 |
| 林外地表 | 57 | 43 | 100 | −20 | −33 | 47 |

（卢其尧，1964）

植物生长需要能量的关系式可写成：

$$n_1\phi = l_1\phi + LE \tag{8.3}$$

$$n_1 = l_1 + L\gamma_1$$

式中，$l_1$为光合作用系数，即植物制造1 克 干物质所用的能量，$\gamma_1$为蒸腾系数，$n_1$为植物干物质能量系数，即制造 1 克干物质所用去的总能量。

据上式，可求出植被的最大生产力，即

$$\frac{\phi}{n_1\phi} = \frac{\phi_{max}}{R} \tag{8.4}$$

式中，R为辐射平衡，即外界可供应的极限能量 $(n_1\phi)_{max}$，$n_1\phi$为植被制造干物质中能量的消耗量，$\phi$、$\phi_{max}$分别为植 被制造干物质克数及其最大值，因此

$$\phi_{max} = \frac{R}{n_1} = \frac{R}{l_1 + L\gamma_1} \tag{8.5}$$

中纬度地区的一般情况是，R为209340焦耳/厘米$^2$·年，$l_1$为16747.2焦耳/克，$\gamma_1$为300，L为292.08焦耳/克，则$\phi_{max}\doteq0.27$克/厘米$^2$·年，即每公顷每年约产生干物质最高为27000公斤，折合鲜重约50000公斤。

## 二、温度与林木、森林

### （一）温度对树木和森林的影响

温度对树木、森林生长发育的影响与温度对农作物的影响以及一些概念与三基点温度、温周期现象、积温等在内涵上是基本一致的。

温度在树木和森林的生命过程中起着重要的作用。林木的光合、呼吸作用、蒸腾作用以及林木的地理分布、生长发育、物质积累都要求一定的温度强度，还要求一定温度的持续时间。温度的时空变化往往会加剧或减弱温度对植物的限制作用。只有在适宜温度下林木才能生长良好，温度过高过低都不利。

1. 温度与森林的分布

我国东部以温度为主导因子划分为北温带至南热带九个农业气候带，其相应的林带如表8.1。可以看出温度带对森林分布的地带性的重要作用。

温度对森林分布的制约作用，基本上可分成下列情况，每种情况又由一些因子所决定。

向极地或高海拔分布的决定因子有：植物致死的极端低温的限制；生长季热量的有效性，即能否有较高的温度及其持续期保证植物有效地进行物质生产；刺激生殖的生长季温度是否有效；昼夜温度的配合以及低温下活动的寄生生物危害等。这些植物多属耐寒树种。

向赤道或低海拔分布的决定因子有：植物致死的极端高温的限制；高温对物质生产和消耗过程的影响；刺激生殖的生长季温度是否有效；昼夜温度的配合以及高温下活动的寄生生物危害等。这些植物多属喜温树种。

在垂直分布上，海拔增高，温度不断降低，森林随高度的出现，也如同从低纬到高纬一样成有规律的带状分布，从常绿阔叶林到亚高山针叶林、高山灌丛、高山草甸直至高山苔原。

2. 温度对树木、森林生长发育的影响

考虑温度对树木和森林的影响必须兼顾温度强度及其持续时间，用积温表示它们的影响比较切合实际。树种生长发育对积温有一定的要求，也有一定的适应范围。不同树种、同一树种不同生长发育时期或者同一树种生长在不同地区或不同高度，对积温的要求都不尽同。但是，也有这种情况：某一地区，从积温考虑，不能满足它生长发育的需要，但实际上它却能在这个地区生长良好。这是由于其他气象因子和积温综合作用，起着相互促进与补偿的缘故。西藏高原东北部对某些树种的生长，积温显然不足，和因高原太阳辐射强烈，补偿了积温的不足，这个树种仍能生长发育良好。还有，某些地区积温能满足某些树种的要求，但因此地最低温度是这个树种生长的限制因子，因而这个树种仍难以存活。华中一带积温可充分满足桉树生长发育的需要，但因冻害时有出现，栽种桉树就难有保证。这些情况说明，用积温表达植物生长发育对温度的要求，有一定的局限性，需要进行订正。温度的其他参数和其他气象因子甚至其他环境因子都应分别根据它们的生物学意义有所考虑。

极端温度对树木的危害，取决于极端温度的强度、持续时间与受影响时的外界环境，也取决于植物的活力状况、所处的生长发育时期以及对极端温度的锻炼程度等。处于休眠状态的孢子、种子和干燥状态的植物，极端温度几乎没有影响。不同树种对同样的极端温度反应常有不同。这种不同可用抗温性表示。它是指植物细胞的原生质在极端温度下的生存能力。不同树种、同一树种不同生长发育时期或不同器官，抗温性不同。根据树木的最大抗性、免受伤害的机能以及原生质的耐性，可将植物分为若干不同的抗寒性与抗热性类型。前者可分为对寒冷敏感的、对冷冻敏

感的和耐冰冻植物。后者可分为对炎热敏感的植物、相对耐热的真核植物和耐热的原核生物。

### （二）森林内的温度变化

太阳辐射及空气的湍流交换作用引起林内温度变化，因此林内温度有其特征。

森林对林内温度的影响是缓热或缓冷作用和保温或保冷作用。太阳辐射到达林冠时，由于反射、吸收，到达林地已大为减弱，因此，在白昼或暖季，林内辐射差额的正值有减小的效应。在黑夜或冷季，林内辐射差额的负值也有减小的效应，使森林对林内温度日变化起着减小的作用。林冠能减低风速和湍流，阻碍林内外及林冠上下之间的热量交换和水汽交换，使林冠在白昼或暖季有保温作用，在黑夜或冷季有保冷作用。两种影响综合作用的结果可见表8.5和图8.2。表8.5是中国林业科学院林业研究所于1959年6月在福建南平杉木林(郁闭度0.7）中观测到的资料，图8.2取自赵儒林等《植物生态学概要》一书中。

林内空气温度的垂直分布在很大程度上取决于林冠郁闭度。在密林中，林冠的作用面是主要的，林地作用面居于次要地位。杉木林郁闭度较大时，温度的最高与最低都出现在林冠表面，日变化也以林冠表面最大。森林郁闭度较小时，最高温度却出现在林地表面，日变化也以林地表面最大。

**表8.5 杉木林内不同高度的气温（℃）**

| 层次与高度(米) \ 各种温度 | | 夜间平均 | 白天平均 | 日平均 | 日最高 | 日最低 | 日较差 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 林冠表面 | 29.5 | 9.7 | 14.3 | 11.6 | 24.5 | 4.0 | 20.5 |
| 林冠中部 | 28.5 | 10.8 | 13.9 | 11.2 | 22.3 | 4.3 | 18.0 |
| 林冠下部 | 21.0 | 10.7 | 13.0 | 11.4 | 20.2 | 5.0 | 15.2 |
| 蕨类地被层 | 0.5 | 11.1 | 12.2 | 10.9 | 18.1 | 5.2 | 12.9 |

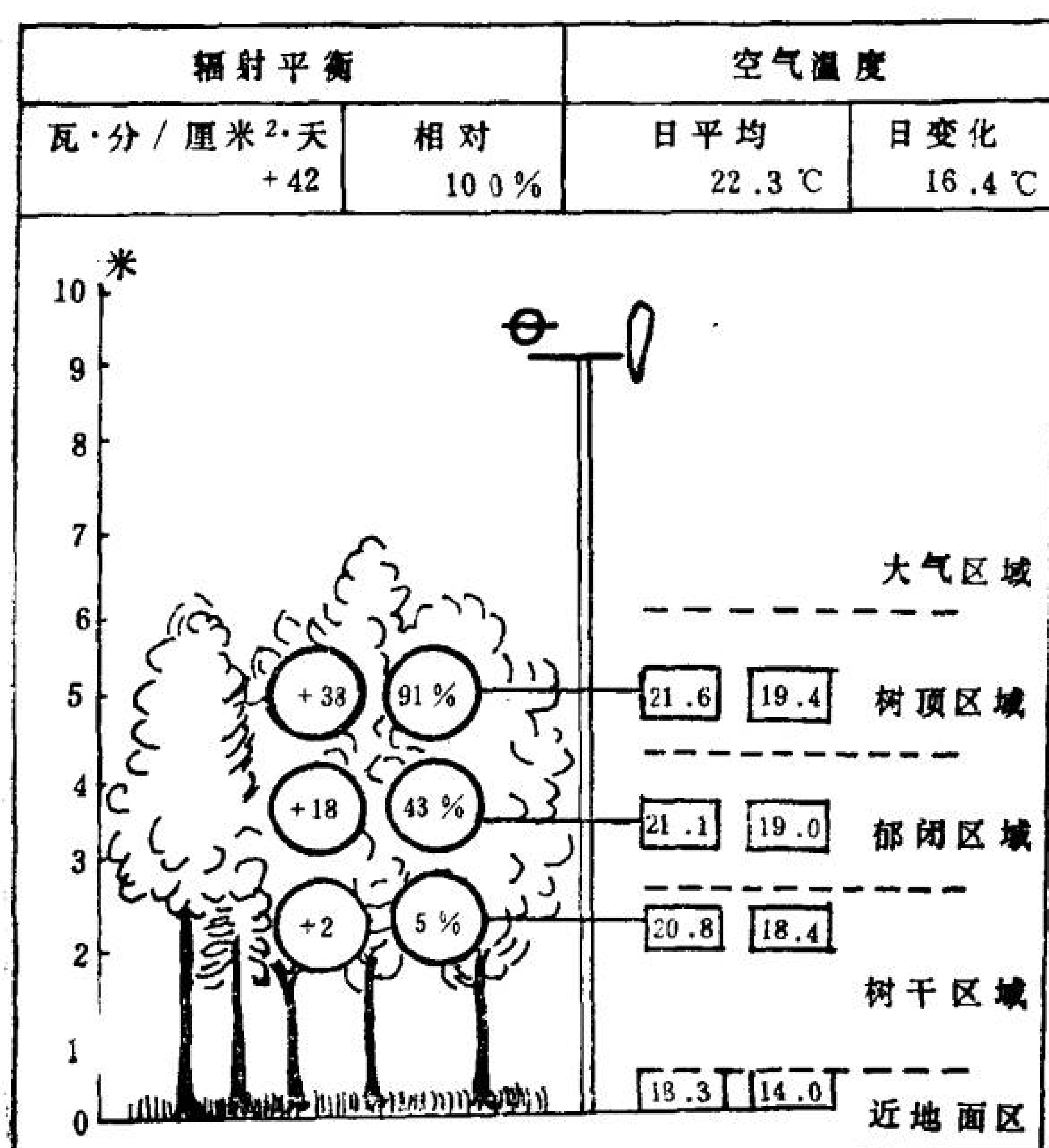



图8.2 郁闭云杉幼林上部及内部的辐射平衡与气温（典型的盛夏晴天）

林内外的温度也有差异。从中国科学院林业土壤研究所1957—1959年在小兴安岭带岭林区的观测资料（表8.6）得到说明。带岭林区红松林年平均温度较高、温度变化较小；落叶松则反之。在冷季，落叶松林和皆伐迹地均低于红松林内相应层的温度；在暖季，皆伐迹地均较有林地的高。温度年变化以落叶松林为最大，皆伐迹地次之，红松林最小。这些特点对其他层次也是如此。

林内土壤温度的变化固受太阳辐射的支配，也与其郁闭度、林龄、枯枝落叶以及土壤物理特性等有关。土壤温度日变化林内较林外小；各树种、各深度的情况都是如此。最高温度与最低温

表8.6 林内外主要月份气温的变化

| 地段 \ 月份 | 1 | 4 | 7 | 10 | 平均或极值 |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 平均气温（℃） | | | | | |
| 红松林 | −16.4 | 2.4 | 18.4 | (2.5) | (0.5) |
| 落叶松林 | −20.4 | (2.2) | 18.3 | −0.3 | (−1.3) |
| 皆伐迹地 | −19.4 | 2.7 | (18.7) | 1.9 | (0.0) |
| 林外 | −19.2 | 3.6 | 19.3 | 2.5 | 0.6 |
| 最高气温（℃） | | | | | |
| 红松林 | −3.3 | 18.7 | 29.4 | 21.2 | 29.4 |
| 落叶松林 | −1.5 | 21.3 | 31.2 | 23.1 | 33.6 |
| 皆伐迹地 | −1.8 | 20.4 | 31.1 | 22.2 | 31.1 |
| 林外 | −0.3 | 22.4 | 31.9 | 23.1 | 31.9 |
| 最低气温（℃） | | | | | |
| 红松林 | −29.9 | −16.7 | 9.8 | −12.5 | −32.8 |
| 落叶松林 | −38.6 | −16.0 | 6.8 | −19.4 | −41.7 |
| 皆伐迹地 | −31.9 | −11.4 | 7.5 | −16.0 | −37.0 |
| 林外 | −34.3 | −9.8 | 8.6 | −15.0 | −37.3 |

（红松林为密林，落叶松林为疏林）

度的出现时间，密林最晚，疏林次之，空旷地最早，各深度也都是如此。夏半年林内土壤温度较林外低；冬半年则反之。林内外最大温差出现在7月，冬半年则很小。

（三）森林热量平衡

森林热量平衡由辐射差额（R）、蒸腾耗热量（LE）、湍流热通量（P）和蓄热量变化（A）等分量组成。在单层林或复层林中，热量平衡各分量的分布概况如图8.3所示。图中，$A_D$示林木蓄热量的变化；$A_S$示林地蓄热量的变化；$P_D$为林冠和大气之间湍流热交换；$P_S$为林冠和林地之间湍流热交换；$E_D$为林木的蒸腾，$E_S$为林地的蒸发。

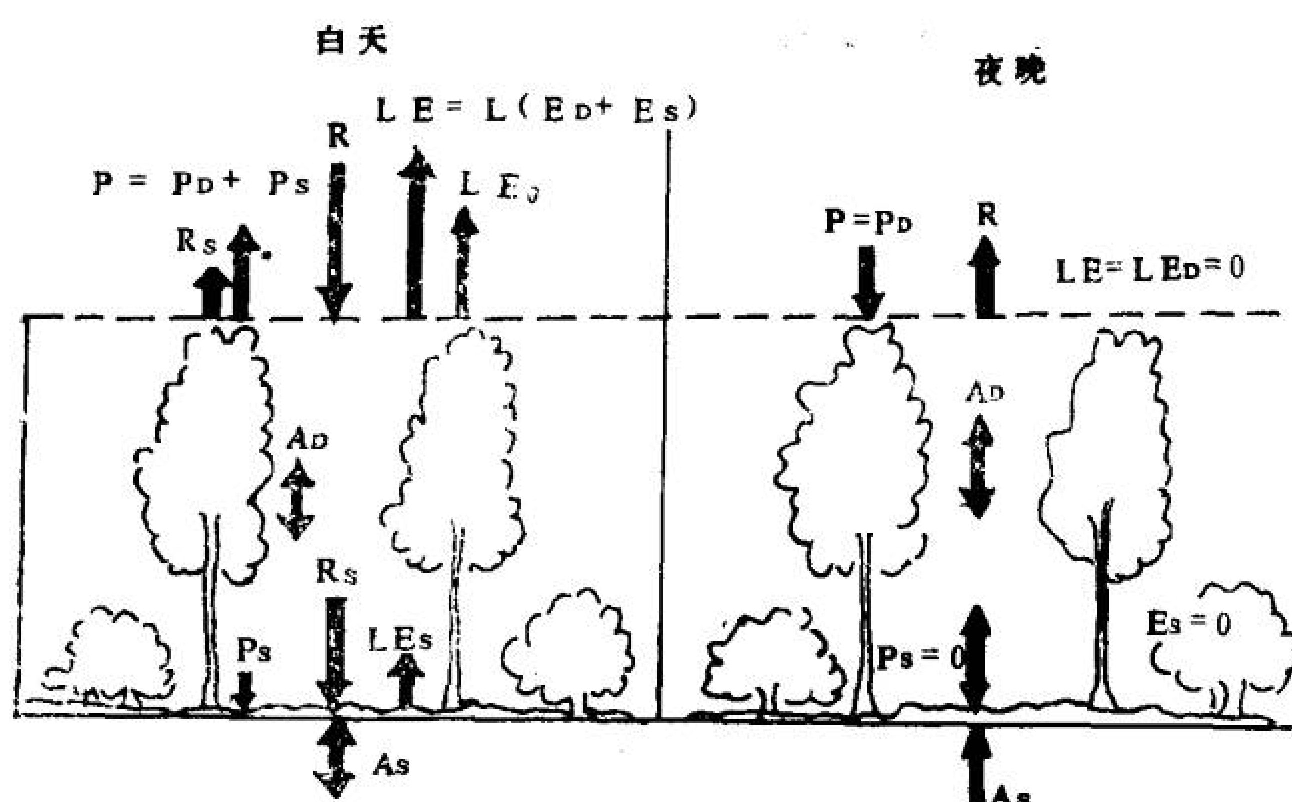



图8.3　在单层林或复层林中热量平衡分布概况
（拉乌涅尔，1962）

总的森林蓄热量变化为A，即

$$A=A_D+A_S \tag{8.6}$$

总的湍流热通量变化为P，即

$$P=P_D+P_S \tag{8.7}$$

总的蒸发耗热量变化为LE，即

$$LE=L(D_D+H_K+E_S) \tag{8.8}$$

式中，$H_K$为林冠的物理蒸发，等于林冠截留降水。

根据上式，森林热量平衡R是：

对林地表面而言，则

$$R_S=P_S+LE_S+A_S \tag{8.9}$$

对林木层而言，则

$$R_D=P_D+L(E_D+H_K)+A_D \tag{8.10}$$

$$\begin{aligned} R &= R_S+R_D \\ &= (P_S+P_D)+L(E_S+E_D+H_K)+A_D+A_S \\ &= P+LE+A \end{aligned} \tag{8.11}$$

太阳辐射到达森林作用面的再分配，昼夜有所不同。不同季

节和不同气候带也有不同。不同森林也有很大差异。由于林冠的存在，地表热量平衡各分量的绝对值林区比林外小得多，夜间则差异较小。

## 三、降水与林木、森林

水包含在林木中的各个部分；水也是林木生命活动所必需的。林木缺水，就生长不好；严重缺水，将导致林木干枯以致死亡。

降水是林木的主要水分来源。全球的降水，控制着全球的生物圈；也控制着陆生植物的分布；各类生态系统以及植物生态类型的形成，都直接或间接地受到降水的影响。

### （一）降水对林木和森林的影响

#### 1. 降水与森林的分布

植物的地理分布除受温度制约外，还深受降水的影响。前面谈到的植物带实际是在水分条件得到满足的结果。从全球角度看，根据降水情况，全球的植物群大致可分为潮湿赤道带、热带荒漠带、中纬荒漠带、湿润亚热带、中纬西海岸带、极地与亚极地带。也可简单划分为荒漠、草原、森林草原、森林、热带雨林等。每一带降水量、降水形式以及强度差异都不小。

#### 2. 降水对林木和森林生长发育的影响

各种形态的降水，对林木和森林生长发育各有不同的作用。对陆生植物，降水是最有效的水分形式，它直接影响土壤水分和空气温度，还影响整个外界环境从而影响林木与森林的良好生长。雾对某些植物有利，但对林木授粉不利，也是某些病虫滋生的适宜条件。露在干旱地区，作用不可轻视。降雪增加土壤墒情，还可起到保温作用。

所有降水在增加土壤水分方面不同等有效，对植物影响也不同。一定量的降水，分散降下与集中降下，对植物的有效性大不一样。同样的降水，分配不匀，对不同或同一树种的影响也有不同。一年内降水均匀分配，特别在生长季节内，就将带来“风调雨顺”，对植物生长有利；集中降落，则渗入小，径流大；并导致

水土流失，增加降水的无效性，对植物生长不利。这实际说明，降水强度及其持续时间对植物的不同影响。

不同树种，需水量不同，对土壤水分的要求也不同。同一树种不同生长发育时期，对水分的要求也不一样。不同地区同一树种也是如此。有些树种喜水好湿，能长期生长在水中或水分过饱和的土壤中，称水生植物，如柳、赤杨、水杉等。有些树种能耐旱，能依靠形态、生理特征，使细胞原生质有效的避开或忍受干旱，称旱生植物，如油松、马尾松、侧柏等。还有的树种既不能在水生植物的生境中生存，又不能在旱生植物的生境中生存，称中生植物。在自然界，中生植物数量最多，如红松、落叶松、冷杉、云杉、板栗等便是。

3. 植物的抗旱性

植物抵御干旱的能力称植物的抗旱性。它主要决定于植物生理、形态特征。抗旱性可以由通过增加吸收、扩大贮藏、减少消耗、尽量使细胞处于有利的水分平衡状态，从而避开干旱的伤害所构成。也可以是原生质具有耐受严重失水而保持不伤害的能力所构成。

大多数维管束植物，其细胞原生质忍受失水的能力是有限的。但能通过许多形态和生理上特征在一定的时间内有效地回避干旱的危害。例如降低水势，扩大根系吸收表面，增强水分吸收；增厚角质层，定期关闭气孔，落叶或缩小叶面积，降低水分消耗；茎叶肉质化，扩大水分贮藏以及长时间休眠等等。

（二）森林对降水的影响

长期以来对森林能否增加降水，国内外学者分歧较大。一种认为森林对降水没有什么影响；另一种认为森林可明显地增加降水。森林影响降水可分为森林影响水平降水和森林影响垂直降水。前者意见比较一致，认为森林能在相当程度上增加水平降水。后者争议较大，有的认为森林可以增加该地区的降水，也有的则认为影响很小。

影响降水的因子很复杂，大气环流、天气形势、下垫面情况、地势高低、地形起伏、距海远近等对降水都有影响。从形成降水的物理过程看，森林能增加降水的有利因素是：

（1）林区与空旷地相比，既通过蒸散提供大气中水分，又因蒸散耗热，因此温度低，湿度大，加强了水汽凝结、凝华过程；同时，森林使反射率减小，净辐射增加，蒸发潜热比例增大，这都有利于形成降水。加以林木枝叶的表面积较大，能捕获较多的雾、露、霜等降水。

（2）森林常高达十几米至几十米，气流通过森林或林网地区作系统性的抬升，有利于云和降水的形成。

（3）森林增大了地面粗糙度，使气流系统抬升，加强了近地层和林冠上的湍流交换，促进水汽向上输送，林冠上部水汽含量增加，降低凝结高度，有利于云和降水的形成。

（4）森林能涵养水源，减小径流，使降水中大部分水分又通过蒸散进入大气中。

（5）森林中出现的小尺度采伐迹地有利于湍流发展。但认为森林不能增加降水也有根据，主要是：

（1）由于下述几项原因造成森林增加降水的错觉：

① 地形的影响增大降水；

② 森林覆盖缓和了下垫面上风速，减少雨量器接收的损失；

③ 风速对雨量器本身产生的影响；

④ 森林蒸散的水汽进入大气中后不易形成降水，因为这些水汽必然随大尺度风系移走，以后即使凝结降水，也不会降在同一林地。

（2）森林气流的抬升作用和森林冠层的湍流交换作用都不足以导致大气中水分大量凝结，产生云和降水。

（3）实际降水中掺入了小尺度不均匀扰动的降水，不能算作森林增加降水。

还有一些原因使得森林是否增加降水不易确定。很少的降水是否大于这些原因导致的误差之总和，有待深入研究。这些原因是：

（4）林地与非林地降水观测和观测仪器本身导致的误差，很难断定降水是多是少；

（5）降水变率的误差包括林地与空旷地以及同一地年际间变率的误差也很难断定降水量增加或减少；

（6）林地与非林地影响降水的其他因子不同导致的误差。

森林对水平降水的影响比较定论。我国云南热带雨林地区的旱季中，林区每天午前都为浓雾笼罩，草木枝叶阻留大量水滴，平均每天可达0.5毫米左右，整个旱季可达70—80毫米以上。初春在庐山，秋冬在北方某些林区，由于雾淞浓重，往往发生枝条压断，可见凝结水量之多。这些水平降水的实例证明不论液态还是固态，在林区都不能忽视。

关于森林增加垂直降水，为排除其他各种因素的影响，许多研究者曾利用森林和气象观测资料，从理论上进行了统计分析。北京林学院陈健等（1965）统计分析了小兴安岭东南坡位于林区的五营和无林地区的鹤岗两个气象站的降水量。两地相距约100公里，海拔分别为283.5米和227.9米，纬度为47°52′N和47°42′N。他们统计了1956—1963年的降水资料，并作了风速订正，还根据石原的地形雨公式作了高度订正，结果表明，五营降水比鹤岗多81.2毫米。山西太岳林区林业气候效应研究协作组认为现有的研究森林降水效应所采用的比较法和统计相关法不适用于山西，他们提出用天气过程雨量分离法，于1980—1982年对太岳林区八次降雨过程进行了个例分析。林区位于山西东南太岳山脉北段，海拔1000—2566米，全区20个林场，总面积540.39万亩，森林平均覆盖率35.54%，林区内设立了24个雨量点。每一次降雨过程，林区某点的雨量（R）可分离为形势雨（$R_1$）、地形雨（$R_2$）和由森林影响（$R_3$）的增雨量。则$R=R_1+R_2+R_3$，分离出$R_1$和$R_2$，

便得出$R_3$。他们初步认为，在特定的天气形势下，较高的森林覆盖地区对降水有一定的增强效应，但增雨量不大。

美国理查德·李(Richard Lee,1982)认为林区降水测定值显示出正的森林影响可能是由于森林位于局部山地上，地形影响的结果，林区降水量较大和森林覆盖有缓和近地面风速的影响，与空旷地相比，减少了雨量器接收的损失。当然这要排除雨量器网安置的高度和紧靠雨量器附近风速的影响，否则实验资料难以证实森林的影响。作者认为森林增加山地的有效高度，可以预料少量的雨量增加是由于地形影响的必然结果。一般说来，地形影响大约40—80毫米/100米·年，25米高的森林可增加局地降水约10—20毫米/年。还可预料由林冠蒸发的附加水量可加入全球平均降水量中，估计增加1.3%。作者又认为蒸腾的水再凝结到大体上同一个地区是不合理的，因为蒸腾的水分进入大气中后，已随大尺度的风系移去。

关于森林增加降水问题，森林可影响水平降水已无争议。但为量不大。森林垂直降水，只在特定的条件下可以发生，为量也很小。很小的雨量是否超出不可避免的误差的总和，还有待进一步证实。看来这个问题的解决只有在完全排除影响林内外降水的其他因子的情况下来比较林内外才易客观地解决。

（三）森林水量平衡

降水落到森林表面受到截留，截留的水分一部分蒸发到大气中，其余沿树干流下，称为树干截留。透过林冠的降水，一部分沿地表成为地表径流，一部分渗入土壤流走成为地中径流，其余渗入地下深层，成为地下水，称为深层入渗水。剩余的存贮于土壤中，称为土壤水，其中一部分供林木蒸腾的需要，一部分供土壤蒸发的需求。森林地区这些水分在一定时段内的收入、支出与储存组成森林水量平衡。图8.4是水量平衡示意图（王正非等，1984）。时段可为一次降水过程、一个月、一季或一年。图中，$r_f$为树干径流量，$f_i$为林冠截留降水量，$f_p$为透过林冠降水量，二

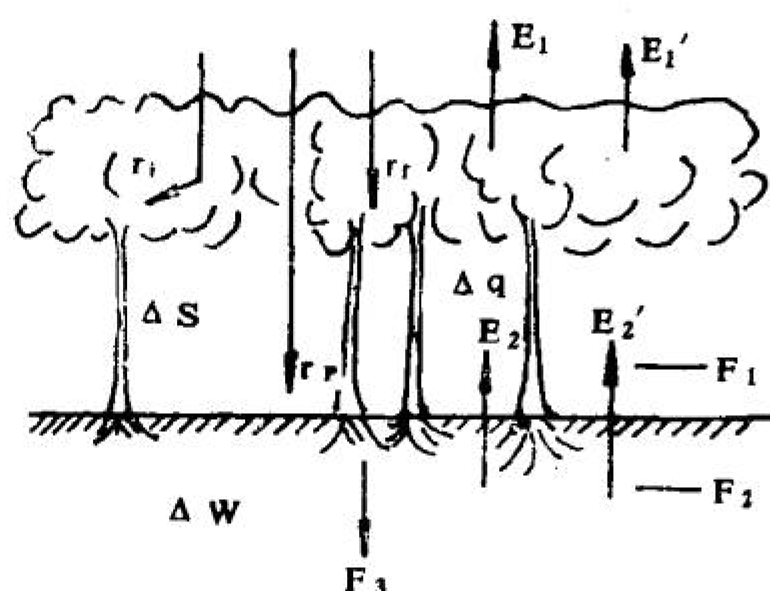



图8.4　森林水量平衡示意图

者之和为r，包沿水平和垂直降水量。$E_1$为林冠的物理蒸发量，$E_1'$为林冠的蒸腾量，$E_2$为林内地面的物理蒸发量，$E_2'$为地表植物的蒸腾量，$F_1$为地表径流量，$F_2$为地表中径流量，$F_3$为深层入渗量，ΔW为土壤存储水量的变化，ΔS为植物体含水量的变化，Δq为空气中水汽量的变化。森林水量平衡方程便可写成下式：

$$r = r_1 + r_2 + r_3 \tag{8.12}$$

$$r = \Sigma E + \Sigma F + \Delta W + \Delta S + \Delta q \tag{8.13}$$

式中，

$$\Sigma E = E_1 + E_1' + E_2 + E_2' \tag{8.14}$$

$$\Sigma F = F_1 + F_2 + F_3 \tag{8.15}$$

从上述几式可知，式（8.12）为降水的第一次分配形式，式（8.13）为降水量的再分配形式。ΔW为多年平均值可视为零。再由观测得知，小兴安岭红松内夏季q值为0.4—1.2毫米，皆伐迹地相应值为0.005—0.02毫米，相对于水量平衡其他分量，数值很小，Δq值自更小，可视为零。红松林水分平衡场内植物体内含水量S为几十毫米，而皆伐迹地相应值仅几毫米。ΔS与林木生长量和季节有关并与生长量成正比，可根据年生长量估计约1—5毫米，在一定时段内可看作常数，与水分平衡其他分量相比可以忽略。这样，森林水量平衡方程便简化为

$$r = \Sigma E + \Sigma F \tag{8.16}$$

（四）林内空气湿度和土壤湿度

林内水汽来源是林下土壤、枯枝落叶层或草本灌木层的蒸发、蒸腾以及林冠的蒸腾与截留降水的物理蒸发两部形成的，其中绝大部分扩散到林冠上空，一小部分到林冠以下。林地湍流交换微弱，一般情况下，林内地面附近一定高度以下空气绝对湿度较林外小，但林内地面附近一定高度以上至林冠下则较林外大。林内相对湿度则任何高度都比林外大。

由于林冠对自然降水的截留和枝、叶的蒸腾，森林有减小土壤湿度的作用；又由于林内土壤表面的枯枝落叶层具有吸水、保水能力，林地土壤又比较疏松，透水力强，地表径流较小，森林又有加大土壤湿度的作用。林内外土壤湿度谁大谁小，要看上述两种作用哪种是主要的。通常土壤深层湿度林内小于旷野，土壤表层则反之。

林内外相对湿度的差异，冬季较小、夏季较大。一日中林地附近的相对湿度总是较林冠附近大，但夜间各高度空气中的水汽都近于饱和，故差值最小，日出后差值又渐增大，中午有所减小，午后又增大到最大值，日落之后差值又渐减小。

林内相对湿度在垂直分布上有夜间型、清晨型、中午型和傍晚型。在夜间，无论密林、疏林，各高度的相对湿度往往达到饱和或近于饱和，最大值出现在林冠表面和林地表面，形成夜间型。日出后，林冠表面迅速增温，相对湿度相应减小，林内仍保持较大的相对湿度，形成清晨型。到中午，随着太阳辐射和湍流交换增强，林冠表面相对湿度减小，其最大值逐渐移向林冠以下，形成中午型。到下午，太阳辐射和湍流交换减弱，林冠表面相对湿度增大，最小值趋于消失，林地附近相对湿度增大，形成傍晚型。

林内土壤干湿状况与林外不同。通常，上层土壤林内较林外湿润，深层土壤则林内比林外干燥。土壤表层湿度林地最大，休闲地最小。土壤深层湿度林地最小，休闲地最大。

## 四、空气与森林

### （一）空气与树木、森林的相互影响

空气对森林的最大作用是空气中的二氧化碳与氧通过植物的新陈代谢而完成碳循环与氧循环，这是地球上生物圈所必不可少的循环。二氧化碳与氧也是生命活动所必需的。但空气污染对树木和森林却有危害，这是由于工厂企业排入空气中的有毒气体如二氧化硫、氟化氢、盐酸、臭氧等通过气孔进入树木体内，影响树木的正常生命活动，最终导致树木生长不良、落花落果或不实，并降低树木抵抗病虫害的能力，使病虫危害更甚。

空气污染对树木危害的症状、机制以及树木对污染的抗性，一些树种又常作为空气污染的临界指标，并据此对空气污染进行监测。

森林可净化空气，如森林能吸收二氧化碳、放出氧；柳杉、松林、泡桐、梧桐、加柏等可吸收二氧化硫；刺槐、银桦等可吸收氯；板栗、梨、桃等和泡桐、梧桐、大叶黄柏可吸收氟等。这些树木对有毒气体的吸收，大大减轻了它们在空气中的累积量，减轻了它们危害生物体的程度。此外，就森林的其他作用来说，森林还有吸尘、杀菌和减少噪音等作用。城市绿化正是发挥森林净化空气、吸尘杀菌、减少噪音以至美化环境，有益人民健康等的有利作用。

### （二）风对森林的影响

风和森林上湍流对树木和森林的生长发育、树木形态以及构造等都有影响。风在很大程度上调节叶面蒸腾、温度，从而对植物体内水分循环有着很大意义。风使空气中二氧化碳循环运转，到达叶面，进行光合作用，并可将空气污染物带来，损害森林和种植业。持续的单向风可改变树冠形状和大小；单向迎风面枝条嫩叶易因干旱而受害；背风面的枝叶则生长正常，最后形成树木偏冠，以至成为旗形或弯近地面。树木被风摇撼以后，还会影响树形和木材质量，会使树木器官矮化，植株矮态。适当的风速是

花粉和种子的传播者；大多数乔灌木树种靠风传播花粉；最适宜的风媒天气是微风与干燥。风媒树种有许多形态上适应风媒的构造；许多树木的种子和果实也有适应风传的构造，因此风对森林的天然更新起着十分有利的促进作用。

（三）森林对风的效应

森林是风的屏障，能降低风速，改变风向和风的结构。

防护林带的良好气象效益以及防风效益是十分明显的。防护林不仅改善水分循环，防止干旱和干热风有效，还能防御各类低温危害，防止水土流失，减少大气污染，防潮防碱以及对防风治沙，改善局地气候都具有重要意义。

风速能改变林内外温湿度特征的分布。森林能使林内、林冠上和林缘附近的风与空旷处的风有显著差异。当风由旷野吹向森林时，风向距离2—4倍树高处，风速开始减弱。至距林缘1.5倍树高处，风被抬升，在森林上空造成密集的流线，风速加大，引起强烈的湍流运动。当风在背面吹向旷野时，大约在10倍树高处有一部分气流向各方向扩散，一部分在离林缘较远处集中运动，风速又逐渐增大。在背风面距林缘30—50倍树高处又恢复到原来的风速。森林风速决定于森林的组成、郁闭度、林龄、树高以及地形、地势等。北京林学院1960年8月在小兴安岭红旗林场的苔草落叶松内曾观测到林内风速垂直分布情况如表8.7。还应指出，林分组成不同，林内风速垂直分布也不同，但总的趋势

表8.7　林内风速的垂直分布

| 高度（米） | 风速仪器位置 | 平均风速（米/秒） |
|---|---|---|
| 16.85 | 树冠上自由大气中 | 1.61 |
| 13.70 | 树冠顶部 | 0.90 |
| 10.55 | 树冠内 | 0.69 |
| 7.40 | 树干上部 | 0.67 |
| 4.25 | 树干中部 | 0.69 |
| 1.10 | 林中地面 | 0.60 |

是一致的。

根据卡伊柯拉多夫（A.K.Каигородов）的研究，林内风速减弱是指数关系，其表达式为：

$$V_{fd}=V_0e^{-kd} \qquad (8.17)$$

式中，$V_{fd}$为林内风速，$V_0$为旷野风速，d为离林缘距离，k为与森林组成、结构特征和大气层结特征有关的系数，苏联有人定其变化范围在近地层为0.02—0.06。

在近地层大气中，风经常涡动，穿入森林后，垂直涡动减小，气流接近水平状态，使林内气流的垂直交换减弱，下层空气易受森林蒸散的影响而变得湿润。

## §2 营林与气象

森林经营的基本任务是利用和改善自然环境，使之与树木的生物学特性相适应，能动地调节环境与树木之间的辩证关系，进而满足人类的各种需要。因此植树造林，必须考虑气象环境，既要利用对树木生长发育有利的气象条件，又要改善对它不利的气象因素，使树木生长良好，最终获得人们所期望的经济效益、生态效益和社会效益。

### 一、树木良种选育与气象

树木的优良遗传性状能否表现，要有一定的遗传基础。这种基础只表示遗传的可能性。要把可能的变为现实，树木必须从外界环境中不断摄取所需的能量与物质，通过新陈代谢，转化为自身的物质后，遗传性才能得到体现。实际上环境条件不仅促使树木外表性状发生变异，还可促进树木内在的遗传基础发生变异。因此，就气象条件来说，树木良种选育，首先要选择最适于某一气候区生长的优良品种，其次，通过改变气候条件，诱导遗传基因发生变异，从而培育出新的优良品种。

#### （一）地理种源选择与良种推广

树种都有一定的自然分布区域，但有的分布广阔，有的狭窄。

自然分布广的树种，它的气候适应性也广。福建林学院林学京从1956年开始收集马尾松31个种源，在福建的莘口（26°10′N，117°35E）和西芹（26°51′N，118°E）两地进行育苗造林试验，结果发现，不同产地马尾松因产地气候条件不同，当代或子代在生长量、形态解剖、生理特性以及物候期上都有显著差异。其规律是（1）不同产地树高生长量与纬度呈负相关；（2）针叶密度、叶鞘长度、每束针叶数、每年抽梢次数与种源纬度呈负相关（四川种源除外）；（3）针叶蒸腾强度、光合强度、叶绿素浓度随种源纬度降低而升高；（4）树木萌动期和开花撒粉期，种源纬度低的到来时间早，果熟期与休眠期则是纬度高的来得早。1972年中国科学院林业土壤研究所对我国北方分布较广的油松也进行了栽培对比试验，其结果与上述马尾松相似。由此可见，同一树种由于分布地理区域不同，形成不同的地理种源，实质是各地水、热、光等气候条件控制下的种内气候适应性的变异。

树木良种的概念是有地域性的，它也包含地方气候的变化规律。因此开展良种推广工作，必须深入研究并遵循地域性气候长期变化的规律。短期的良种抗病试验，由于气候资料的代表性不足，有的是难以成功的。

（二）引种驯化

引种工作是提高林业生产力的有效措施。引种实际上是研究树木如何适应新环境的问题。新环境虽然包括土壤、地形地势、生物、气候等环境，气候因子却是极重要的。

引种后引种树木不经人为措施便能适应引种地自然条件的称为自然驯化，引种后，引种树木需要通过人工措施（如从农业气象效益上考虑营建防护林、风障以及改变小气候的其他措施），使其逐步适应新的环境条件，并发生遗传性变异的称为气候驯化或人工驯化。从根本上说，树木引种驯化就是研究和解决树种遗传性的要求与引种地区环境条件特别是气候条件之间的对立统一的问题。

温度、降水、日照、风、湿度等也会成为树木引种的限制因子。但引种的成败不是某一单项因子所能决定，而是许多因子综合作用的结果。另外，某一气象要素对树木影响的临界值有一个幅度，其他条件的变化，很可能使树木对这一生活条件得到互补的效应。总之，树木需要一定的气候条件，即使引种地区不满足这个条件，经过人工驯化，可使树木改变遗传性，逐渐扩大适应能力。

## 二、育苗与气象

### （一）苗圃选择和规划

苗圃的地理位置和小气候环境，对苗木生长有很大影响。气象条件中许多参数都是苗圃选择与规划的重要依据。一般说来，苗圃应避免选在局部风口、土壤冷湿、霜穴、日照不足以及易发生日灼等地段。在苗圃规划设计上要根据降水与蒸发情况设置灌溉及排水系统；要根据主风方向和风速决定防护林与宽度等等。当然还要根据其他自然因子与经济因子综合考虑。

### （二）种子发芽

种子萌发所需的基本气象条件是温度、水分和氧。北方林木种子在5—8℃便可缓缓发芽，15℃时发芽明显加快，25℃时发芽最旺。种子只有在湿润条件下才能发芽。环境中的含氧量直接关系到种子的生命活动，因此在种子催芽过程中要注意补充氧气。多数林木种子发芽不需要光，也有一些种子在光刺激下发芽更好。

### （三）播种育苗与苗期管理

气象条件每年周期性变化决定着育苗生产过程。因此要根据当地气候变化播种育苗。

苗期管理要考虑遮荫、抗旱、排涝、防霜、防寒等。

从早期设置林间苗圃，发展到苗床覆盖塑料薄膜，建立塑料大棚或玻璃温室育苗，以后在国外又出现了人工气候育苗室，其目的都在于研究用人工措施控制光、热、水、气以提供最佳气象条件，促进苗木速生丰产。这种人为控制气候的措施，具有充沛

的生命力，在现代化林业建设中正在逐步发展。

（四）扦插繁殖

这是培育苗木的重要方式。扦插能否成功除了枝条本身的生理状态外，培养的环境也是决定性因素。一般易于生根的树种，扦插所需的气象条件大致与播种育苗相同。它们对温度、湿度、光照和二氧化碳都有定量的要求。

## 三、造林与气象

（一）适地适树原则

根据树种生物学特性选择相应的立地条件和根据造林地立地条件选择合适的树种。立地条件包括土壤、地形地势、生物、气候等，如果说土壤、地形等能决定造林后林分生产力的大小，那末气候就从根本上决定某一树种在这块造林地上能否栽植和栽植能否生长良好的问题。

造林区划就是在气候区划的基础上，根据树木的生物学特性，选定各地区适于发展的树种。

（二）造林季节

造林季节的选择就是对树木物候期的合理利用。树木每年有生长期与休眠期，造林季节一般选在树木休眠期行将结束，生长期即将到来之际。这时起苗、运搬、栽植对苗木有机体损害较小，定植以后天气的变化转向有利于苗木生长，苗木容易成活。这个时期在我国北方通常是春季。根据以候温划分四季的标准，全国以春季尤其是初春造林比较合理，因这样的四季划分与各地物候期大致相符。由于我国南北东西 3 月间气候差异悬殊，统一在植树节（3月12日）造林是不合适的。

在温带或北亚热带造林多选在冬去春来之时。在热带和南亚热带，树种没有明显的休眠期，为了起苗不致伤根，减弱根系吸水能力，一般在雨季造林。在温带干旱地区，春季风大雨少，苗木容易干枯，也以雨季造林为好。这说明造林季节的选定不单是温度而是降水和温度。

由于适宜的造林时间较短，限制了大规模造林的发展。当前国内外已大力推广容器苗造林。容器苗造林成活率高，是有发展前途的。

（三）营造混交林

它能提高林地光能利用率，改善林内环境条件，加速养分循环，增强林分抗灾能力。

利用混交林提高光能利用率的途径一是合理搭配品种，促进林冠及早郁闭，把光能提前集中用于形成乔木树干上；二是选择耐阴树种栽于第一层林木之下，把上层树冠透射的光充分利用起来。还有一个普遍的混交方式是在阳性针叶树林冠下栽植耐阴的阔叶树。前者是一个阶段混交的所谓套种形式，后者是两种林木混交的所谓间作形式。

混交林一般是垂直郁闭结构，林内小气候与空地或纯林都不相同。混交林内温差小，湿度大，光量逐层减弱，二氧化碳平均含量较高。混交林各层小气候变化有良好的生物学作用。

**四、森林更新与气象**

森林采伐后，林地环境发生变化，变化的程度因采伐规模及主伐方式而异，从而又影响到森林更新的效果和速度。因此研究更新与气象条件要联系到主伐。

（一）不同主伐方式的小气候效应

局部森林采伐后对森林小气候的影响是增加光照、提高温度、扩大温差、降低湿度、加速蒸发、增大风速。不同主伐方式影响的程度由强到弱大体可排成如下序列：大面积皆伐→伐区式皆伐→小块皆伐→二次渐伐→径级择伐→经营择伐。

王正非等1956—1958年在带岭红松林内研究了两种极端的森林小气候、红松原始林及其大面积皆伐迹地。结果是，（1）生长季内（5—9月）日照辐射总量月平等值，大面积皆伐迹地比红松原始林大5—15倍。（2）迹地和林内比较，气温在生长季内有显著提高（尤其在昼间），全年平均气温稍有降低。地面和

地中温度在生长季内可提高10—20%，地温、气温最高或最低值，迹地明显大于林内。（3）地面降水量迹地大于林内，蒸发量迹地比林内大1—3倍，绝对湿度普遍降低。

不同主伐方式造成森林小气候的不同，主要由上层林冠作用面有无或疏密差异所引起。林冠的有无及其结构，对于辐射差额和湍流系数都有极大影响。因此，主伐方式不同的迹地上会出现不同的小气候。

（二）森林更新的气象条件

森林采伐必须为森林更新创造条件，这是森林经营的一个重要原则。不同的更新方式、不同的树种对更新条件有不同的要求。天然更新要求条件高，人工更新的要求低；更新困难的树种要求条件高，更新容易的要求低。

天然更新种子主要借助风力从母树上传播到林地去。某一地区某一季节的风向、频率能决定下种的方向和距离，因此要了解该地的主风方向。风力也很重要，经常有大风之处不能保留散生母树而应保留团状母树。

种子萌发需要一定的温度和水分。例如，25—30℃适于杉木萌发，红松要在－10℃以下越冬后才能发芽。土壤含水量在20%以上对多数树种发芽有利。在比较湿润、温度稍高、有一定避荫的森林，对大多数乔木种子发芽有利。幼苗生长也需要适宜的温湿条件。剧烈变化的气象条件常会引起幼苗死亡。例如，地面温度超过45℃，幼苗发生日灼。冻害、旱风、严寒等的出现都可能使幼苗受害。大多数树种在幼树期间要求较好的光照、温度、水分和养分条件。阴性树种喜在林下生长，要求气象条件比较稳定。

（三）森林更新与地方气候

森林全部砍伐，又没有及时更新，森林气候自不复存在。森林更新不仅要在其自然分布的地理气候带内，还要在一定的植被类型所形成的局部环境里才能做到。

## 五、森林抚育采伐与气象

抚育采伐（也称间伐）就是人工干预森林自然稀疏的一种措施。其实质是通过砍伐过密处的部分树木，给保留的树木创造更好的生长环境，达到提高林分产量和质量的目的。森林在不同的年龄阶段上有不同的抚育采伐方式。幼龄阶段进行透光抚育，中龄以后进行生长抚育。各种抚育采伐尽管目的不同，做法不一，却有一个共同特点，就是采伐后要改善保留在林木周围的小气候环境。

### （一）透光抚育

透光抚育对林分的气象效应是：增加光照，提高温度、调节湿度，还能改善$CO_2$的供应。

1973—1975年周正等曾对18年生的红松人工林进行透光抚育试验，观测时间 5 — 9 月。结果是，砍伐上层林木越多，下层红松的受光量越大。透光后气温和地温提高，相对湿度减小。这些变化可能对树木生长有利，但全光下温度极值出现的频率较大，易使树木受害。林内空气$CO_2$浓度比一般大气（0.57 毫 米/升）为高。此外，透光强度越大，红松代谢作用越强，制造干物质越多，树木生物产量也越高。这是小气候改变对树木生长的直接效应。

### （二）生长抚育

林分进入杆材龄阶段，开始生长抚育，增加林木生长量，提高木材质量。间伐前后气象条件变化与树木生长有密切关系。间伐后林冠郁闭度降低，林内相对辐射加强，保留林木的树冠接受的光能增大，特别是原来被遮荫的枝叶受光量增大，树木的光合效率随之迅速提高。据国外报导，在郁闭的林下，松树光合作用90%产量集中在树冠的上部和中上部，被遮荫的针叶虽然不少，但在树木光合作用中作用很小。透光后这些针叶立即从消费者（呼吸作用大于光合作用）变为生产者（光合作用大于呼吸作用），即使不扩大林分叶面积，也能增加林木的产量。

## 六、树木种子生产与气象

树木种子产量的多少，除决定于树种生物学特性外，还受外界环境条件的影响，其中气象条件对树木种子生产过程的影响更大。

### （一）树木开花结实与气象

同一树种在不同环境条件下结实年龄出入很大。改变环境条件，可以加速树木新陈代谢，提前发育。在人工控制气候的情况下，更可以促使树木结实年龄提前。

树木种子形成包括花芽分化、开花、授粉、受精、胚发育、种子成熟等时期，每通过一个发育时期需要不同的温湿条件。但统计树木开花、结实≥5℃的有效积温及其所需的湿度，发现各个发育时期所需要的温湿条件是比较接近的。

树木开花结实的生物学特性受气象条件的影响，还表现在不同气候年分树木雌、雄花的比例差别很大。另外，在某些气候反常的年分，往往能够引起树木大量结实，老龄树木更为明显。这两个问题都有待深入研究。

### （二）种子产量与气象

多数乔木树种产生种子不是在一个生长季节内完成的。例如杨树和落叶松是第一年形成花芽，第二年开花、授粉、结实。松属树木从花原基发生到种子成熟的全部生育时间大约需要26个月。在这期间种子发育要经过酷夏、严冬、干旱、潮湿等不同季节的变换，显然与树木种子产量的丰歉是密切相关的。种子发育过程的胚性时期从花原基出现到花芽形式，需要长日照和高温，如果天气异常，花芽将停止发育。花期内气象条件更有直接影响，大多数乔木无风不能授粉，而晚霜冻、低温、连阴雨、干旱、大风等都可能使花遭受损失。果实发育期间遇连续阴雨间多云的天气，可使幼果脱落。特别在干旱、秋季异常高温时，都会使果实受损。许多研究证明，不利天气可能使树木座果率降低30—50%。

树木结实的间隔期固决定于树木生长发育特性，也与气象环境有关。在一定地区生长着的树木，尽管天然更新或人工造林的年代不同，立地条件也有差别，却有着相同的丰歉年规律，这很可能是局部气候以外的更大范围的天气状况与树木结实周期性有关，这个问题有待深入研究。

促进种子丰产的林业措施很多，强度疏伐是主要措施。它可以改善母树周围小气候，增加营养空间，提高种子产量。疏伐可以提高母树周围的温度和改善光照条件，从而又引起温、湿、风等相应改善，对大量结实产生有利影响。

（三）种子贮存与气象

在种子贮存期间要保持种子生命力和较高的发芽率，温湿度环境是最为重要的，光照、空气和种子含水率等也有关系。温度高对种子贮存不利。恒定的较低温度可延长种子寿命。大多数种子在－5—5℃之间有利于长期保存，空气相对湿度影响种子含水量。种子干湿程度与贮存环境中的相对湿度一致。每种种子都有最合适的含水率，当把空气湿度稳定地调整到种子所需要的含水量时，就能长期保存种子的生活力。空气成分对种子贮藏也有影响。氧气多能加速种子呼吸，消耗种子养分。在缺氧情况下，环境中乙烯增加，有利于种子贮藏。

## §3　林业气象灾害

### 一、森林火灾与气象

森林保护是林业生产中一项十分重要的任务，从某种意义上说，森林保护甚至比植树造林更重要。森林的毁坏主要来自乱砍滥伐、森林火灾和病虫危害。其中，森林火灾的危害基本上决定于气象条件。

森林火灾是森林保护的大敌，因为它发生次数多、蔓延速度快、毁坏面积广、扑救难度大。仅在1978年一年内，欧洲发生森林火险43000余次，受灾面积44万公顷，直接损失近6亿元；美国

和加拿大火灾153000次，受灾99.9万公顷。我国林区的森林火灾也极严重。据统计，仅主要木材生产基地之一的内蒙古牙克石林区，近20年来每年平均的火灾火情就有70多起，年烧毁林地60多万亩。福建西部林区近30年平均每年山火300余次，年平均受害面积11.7万亩。森林火灾是林区的头等大事。

（一）森林火灾的发生规律

1. 火灾的发生发展过程

火灾的发生，必须具备有可燃物质，火源和促使燃烧蔓延的外部条件。在森林中可燃物质是十分丰富的。问题是这些活的和死的有机物在什么情况下可以起火，什么情况下可以燃烧。有机物点燃要求的条件比进一步燃烧要求的条件高。它决定于可燃物的特性、温度和供氧状况。在野外条件下，温度是主要的。从表8.8可见，林地上草本植物的燃烧点较低，约在260℃以上即可着

**表8.8 森林可燃物燃点**

| 植被物 | 材料 | 加热时间(分钟) | 燃点(℃) | 自燃最高(℃) |
|---|---|---|---|---|
| 拂子茅 | 茎叶截断 | 4.18 | 269 | 381 |
| 莎草 | 茎叶截断 | 4.22 | 263 | 399 |
| 枯枝落叶 | 小捆 | 4.03 | 261 | 395 |
| 胡枝子 | 枝叶 | 4.33 | 295 | 450 |
| 白桦 | 边材带皮 | 5.08 | 366 | 445 |
| 山杨 | 幼树干 | 3.92 | 301 | 440 |
| 落叶松 | 边材 | 4.82 | 364 | 434 |

（引自王正非）

火，而自然最高温度约在380℃到400℃；木本植物尤其是乔木碎片，燃点均在360℃以上，自燃温度接近450℃。一般说来林地上的枯枝落叶和草本植物是主要引燃物，一旦高温物体（火源）落在地面上。首先引起它们的燃烧，随即释放大量热能。如果可燃物是连续的，则燃烧范围迅速扩大、蔓延。

森林火灾的火源有人为的，也有自然的。无论是国内外，人

为原因是最主要原因。据欧美一些国家统计，不慎失火和有意纵火占90%，雷击火只占2%。我国据黑龙江、内蒙古东部、福建西部、四川阿坝等林区统计，人为原因占森林火灾的60%到90%以上。当然不是每一火源的发生都能引起火灾，除了决定于可燃物质的性质和数量外，很大程度上决定于当时的气象条件。它影响到火势的强度、蔓延方向和受灾面积的形状，因而也决定了火灾的等级以及灭火的战略方案。

2. 森林火灾与气象条件

（1）森林火灾的季节性　林区发生火灾都有很强的季节性。我国森林火灾的高峰季节大致分为北方、南方两种类型（图8.5）。北方主要发生期在春季，秋初是一个次高峰，即呈双峰

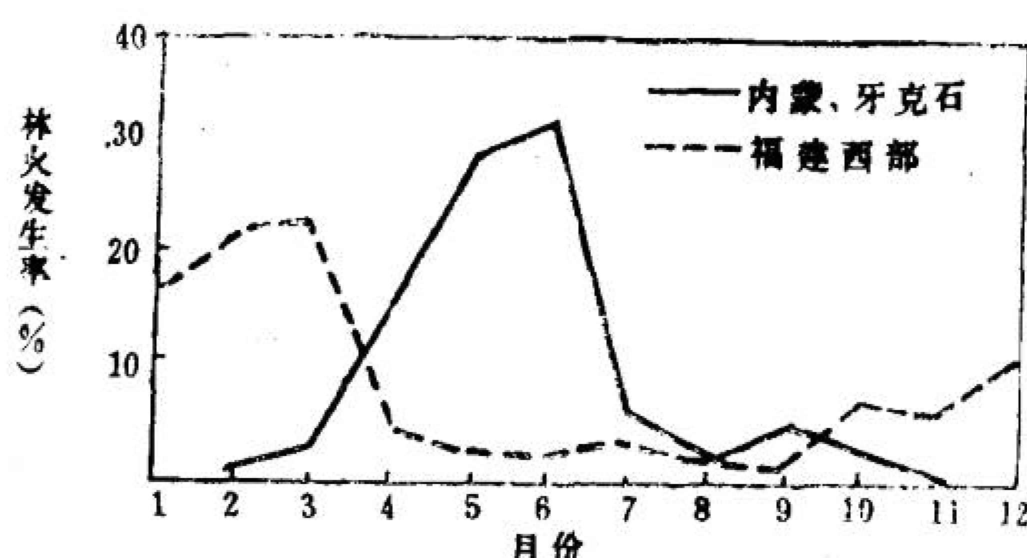



图8.5　我国南北林区不同季节林火发生次数占全年的百分率比较

型，在大兴安岭林带的东部表现最为明显。如伊春林区，每年火灾有45.8%发生在4、5月份，28.2%发生在9、10月份。但在南方林区，如福建西部每年只有一个高峰期，进入秋季以后，森林火灾的发生率逐渐增加，冬末春初为最高点，再后则显著下降。北、南两种类型是由北、南地区的气候特点决定的。燃烧是一种物理过程，决定于物质与环境的温度、湿度、氧气供给与风速，森林火灾的发生次数与强度自不例外。根据各地的经验，对林火发生影响最大的气象因子是空气湿度（通常以14小时的相对

湿度表示）和气温日较差。因而凡是火灾高峰期总发生在干旱季节，这时可燃物含水量低，最易引燃。

气温日较差对森林火灾的影响，据分析，凡是较差大的多是稳定晴朗天气，中午温度高、辐射强，闽西、郴州就有当气温日较差大于7 ℃时，森林火灾发生机率增大的经验。相对湿度对森林火灾的影响，各地经验不一。有的认为当相对湿度低于70％时，火灾机率明显增大；有的认为50％是转折点。林火的发生与当日或前一时期降水的关系，各地经验也不一致。有的认为一次降雨5毫米以下的日子都有发生森林火灾的可能，有的认为应以2毫米日降水量为界。对于森林火灾与前数日降雨的关系，有的人认为关系不大，但是国内外多数资料认为关系是密切的。

森林火情的发生与蔓延也有日变化，据广西来宾县的分析，一天之内以10—15时的发生机率占总次数的82％。

（2）蔓延的火场型　一场森林火灾的大小，决定于它蔓延的速度和范围，而火的蔓延与风力、风向有关。在平静无风的状况下，火以匀速向四周蔓延，火场大致呈圆形；如果有风而风向不变，则顺风方向的火锋明显，火场大致呈等腰三角形，火锋为顶；如果风向摆动不定，则火场大致呈倒等腰三角形，火锋为底。风力越大，顶角度越小。

在野外或林缘内有风力或地面坡度影响时，火的实际蔓延速度V可用下式表示

$$V = V_0 \cdot K_W \cdot K_S / \cos\varphi \qquad (8.18)$$

式中，$V_0$为无风时火的蔓延速度（米/秒），$K_W$为风速订正系数，$K_S$为蔓延系数（因可燃物性质与厚度而异），$\varphi$为地形坡度与水平面的夹角。据美国和加拿大的研究，风速与火蔓延率的关系可以用对数坐标纸绘成一条直线（图8.6），据此，可以很容易地查得$K_W$值随风速的变化。

风力大小对火场蔓延很有影响，风力越大，火的逆蔓延速度和侧蔓延速度越小，而火的前进速度越大，火场三角形的高(AB)

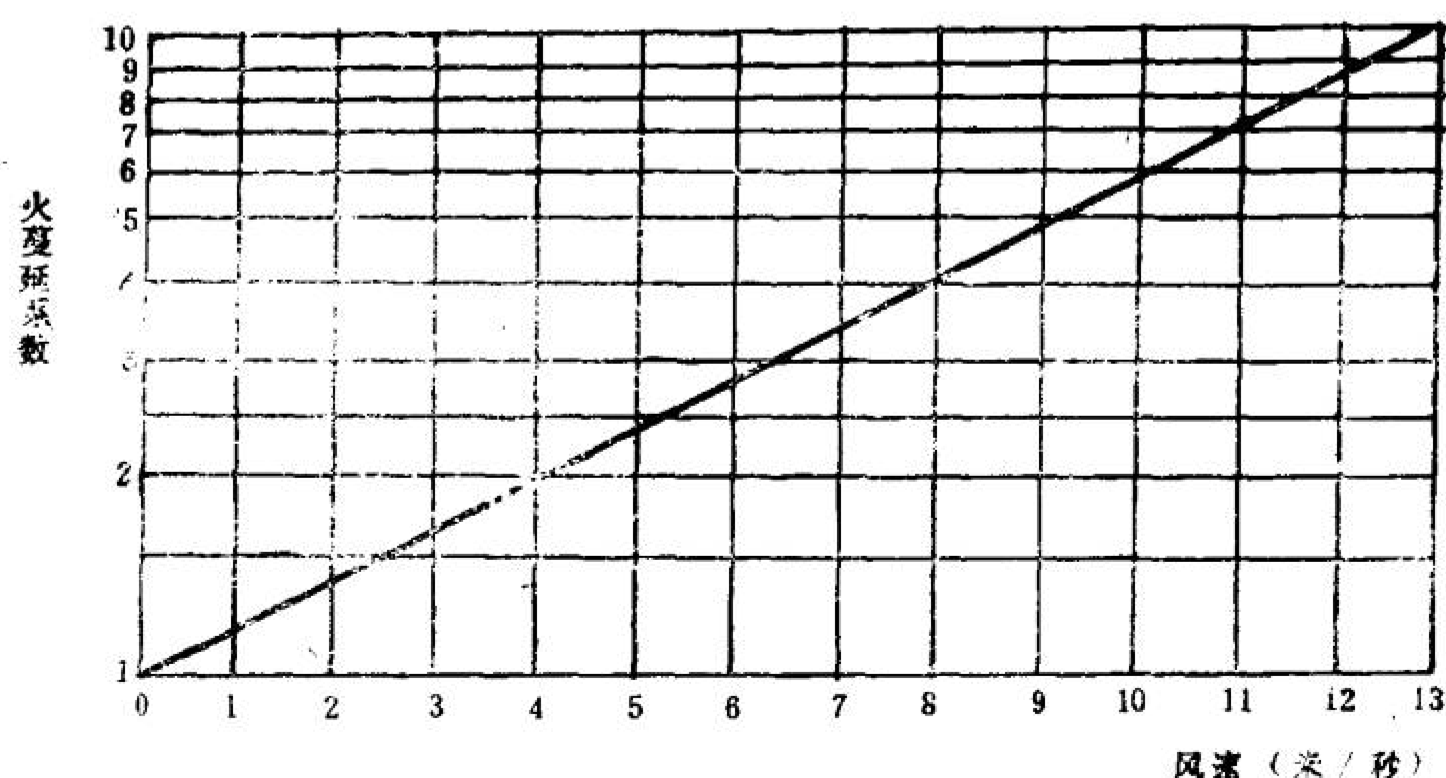



图8.6　风速对火蔓延速度的影响

与底（CD）的比值将越大，火场拉得越长(图8.7和表8.9)。林火蔓延的度量一般可用：从起火地点到火头(火锋)的直线距离；火场面积；火场的周边长度等方法。迅速地确定三者数值对正确布置灭火战斗具有重要意义。因此可知不但在防火中离不开气象，一旦火险发生，及时提供所需气象参数更是十分必要的。为此在火险期应加强风速风向的监测与预报。当风速超过10—15米/秒时，火灾蔓延很快；另方面这种天气又使得某些类型的飞机被禁止飞行，也禁止跳伞灭火队员跳伞，增加了救火工作的难度。

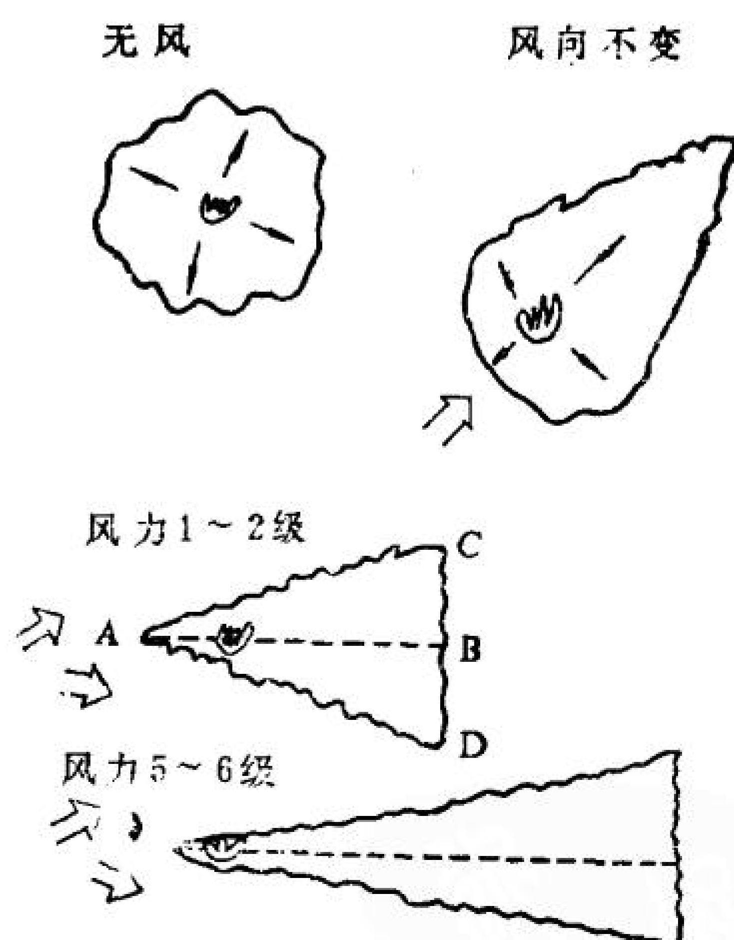



图8.7　风向、风速对火场轮廓的影响示意图

**表8.9 风力与火场形状参数的关系**

| 风　　力 | 正切角度 | 正切角度· | 火侧蔓速度 | 火逆蔓速度 | 高:低 |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 45 | R | V | V | 1:1 |
| 1—2 | 25 | $R_1$ | $0.47V_1$ | $0.05V_1$ | 10:9 |
| 3—4 | 20 | $R_2$ | $0.36V_2$ | $0.04V_2$ | 10:7 |
| 5—6 | 15 | $R_3$ | $0.27V_3$ | $0.03V_3$ | 10:5 |
| >7 | 10 | $R_4$ | $0.18V_4$ | $0.02V_4$ | 10:4 |

(王正非等,1958)

（3）自然火源　　在引起森林火灾的自然火源中，首先是雷击火(闪电)。雷击火是积雨云中,云对云或云对地的火花放电,在正负电荷区间电场的电位差可达几百万伏,温度可达18000℃,在一定条件下这种闪电能直接引起森林中可燃物着火，伴随着风助，迅速酿成大火。一般说来，雷击火的发生频率不高，大致不超过10%,但有的地区或个别年份,雷击火可以相当严重。例如内蒙古的牙克石林区,1979年雷击火竟占到当年火灾总数的52.9%,使原始森林烧毁 6 万多公顷。

闪电造成可燃物的引燃主要决定于闪电的特性（包括次数、雨迹数量、面积密度与闪电强度）、风暴的特性（包括覆盖面积和移动速度）、降水的特性（降水量、持续时间、降水地域范围）和可燃物特性（可燃性、含水量、数量、分布和对降水的反应）。雷击火几乎只发生在纤细的可燃物上，尤其是针叶树的落叶枯枝以及枯树朽木或树椿上。由于可燃物在引燃过程中被加热，在被引燃之前，它们所含的水分必须迅速蒸发掉，至少也要表层水分蒸发掉。降雨对雷击火的引燃无疑是一个限制因素，因为它增加了纤细可燃物的含水量。纤细可燃物的含水量取决于降雨的速率和数量。随着降雨的结束，含水量的减少是十分快的。

在每个风暴的迳迹内需要考虑降雨区域和闪电区域。闪电区域（雷击区域）有如一个带有跑道的运动场，降雨区域只是运动场去掉跑道的场地部分。也就是说，地面的雷击场包括降雨区域

和其外围的无降雨区域，在降雨区域内雷击的引燃概率比降雨区外小，两者有不同的引燃概率。

福癸（Fuquay）给出了一个预报闪电引燃导致森林火灾的概率系统（图8.8）。目前这方面的研究还在继续进行。雷击火有很强的季节性，特别容易发生在干热天气遇到“干打雷”的情况。这种天气没有降雨，却常伴有暴风，将小火吹旺。在山区或靠近金属矿藏（主要是铁）含量丰富的山区，闪电的次数较多。

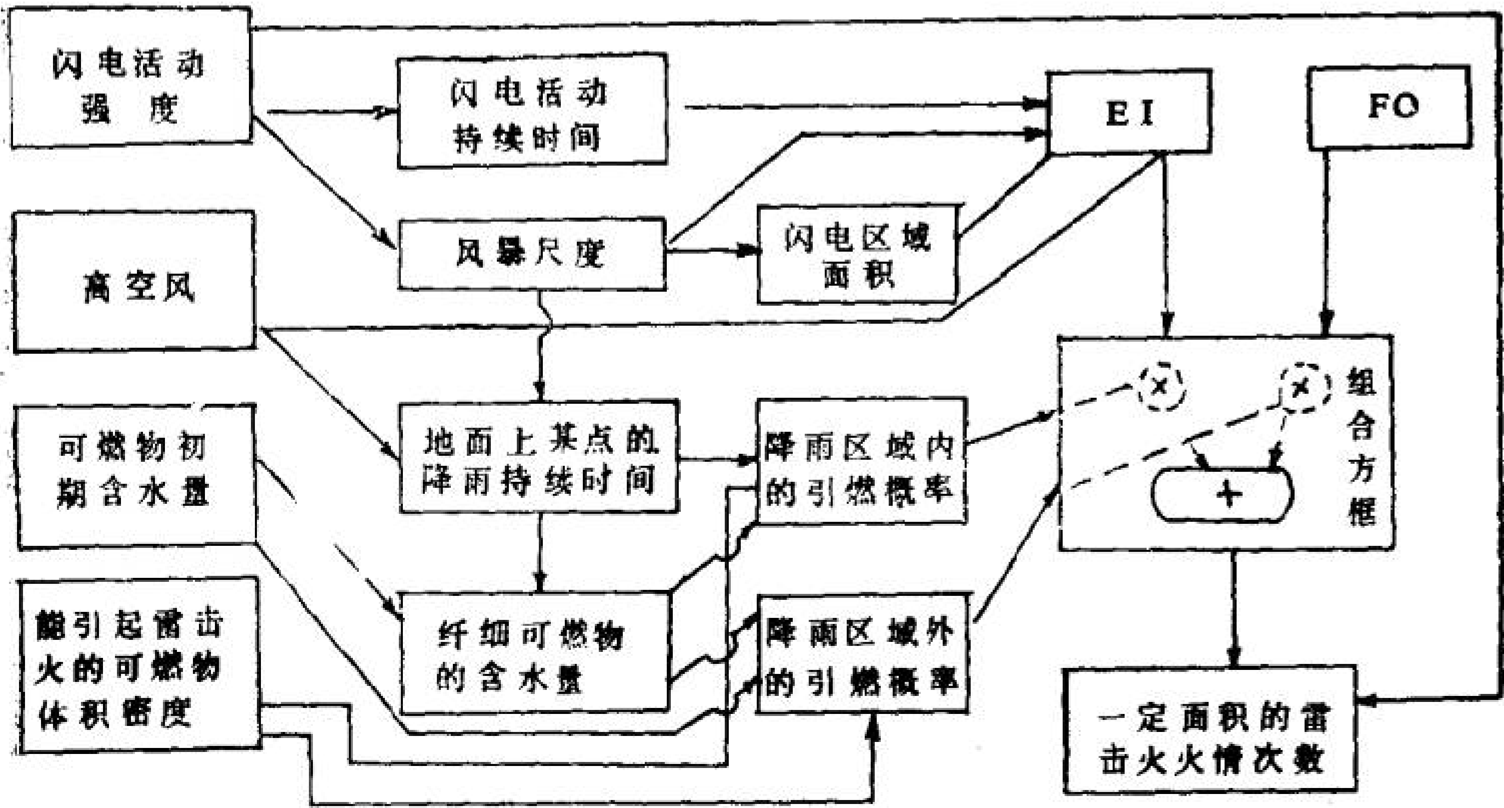



图8.8 单位面积上雷击火引燃概率框图

图注：FI为闪电区域内降雨区域所占的面积比值，FO为无降雨区域的面积比值，组合方框为每个长连续电流的引燃概率

在高纬度的林区还有一种所谓越冬火灾，通常也列为自然火源。这是冬前未被扑灭或未被发现的泥炭层内无火焰的燃烧，冬季持续下来没有熄灭，也没有蔓延，待次年春季土壤表面融化后，雪层消失，地面植被变干，燃烧转到地面以上，成为明火。但这系发生在泥炭层发育很厚的地方，纬度越低，越没有这种泥炭层的存在，这种起火的可能性也越小。

（二）森林火灾与其它因子的关系

森林火灾的发生发展与森林本身的特征有一定关系。在亚热

带林区中，树种繁多，这种关系尤为明显。例如据福建龙岩地区的调查（1982），（1）在树种组成上，以富含树脂的马尾松、杉木等针叶林燃性最大，其次是含有大量可燃性油脂（或气体）的樟科、金缕梅科乔灌木以及叶薄含纤维较多的毛竹林，再次为针阔混交林或针阔毛竹混交林；而由壳斗科的米储、青岗栎，山茶科的油茶、茶树和杨梅科的杨梅等树种组成的阔叶林，林土湿度大，含可燃性油脂少，比较不易燃烧。（2）在树木年龄上以幼龄林最易起火，中龄林其次，成熟林多树冠高大稀疏，枯枝落叶较少，较不容易起火。（3）在林分郁闭度上以中等（0.3—0.6）较易燃烧，其次是郁闭度0.6以上的，低于0.3时树冠间隔较大，不易形成树冠火，危害性较小。（4）在灌木和地被物上，由喜光、耐旱、叶薄、含可燃性油脂的杜鹃、胡枝子、乌药等和阳性杂草如芒萁、野枯草、白茅等组成的林分易燃，而由具有相反特性的柃木、杨梅、毛冬青等和阴性杂草如山姜、狗脊等组成的林分燃烧性小。

地形对森林火灾也有影响。由于气温随海拔增高而下降，降水量和相对湿度却随海拔而增大，森林火灾在一定范围内随海拔增高而减少。此外，在倾斜的山坡上火情由下向上蔓延速度快，由上往下蔓延慢。在丘陵山脊的顶部火情蔓延快，在平坦洼地蔓延慢。斯雷兼斯基（В.А.Сретенскии，1978）指出可燃性与土壤类型和地势变化的关系（表8.10），表明在砂土的高地上是最危险地区，那里雨后的第二天转晴，土壤晒热，稀疏小草和老草即可枯干易燃。这实质上还是和某些小气候差异有关的。

（三）森林火险指标概述

减少森林火灾的损失，必须以预防为主。这就要在充分认识森林火灾规律的基础上，制订出一整套的森林防火措施。其中，能在最短的时间内发现火源，判断该火灾的可能危害程度、蔓延速度与方向，是指挥防火战斗的先决条件。所以森林火险预报的关键是考虑气象因子的定量关系，即森林火险指标。

表8.10 森林火灾与土壤、地势的关系

| 土壤 | 地 | | 势 | | |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| | 低地 | 平地 | 起伏地 | 坡地 | 高地 |
| 砂土 | | | | | |
| 砂壤土 | | 燃烧可能性减小 | | | |
| 壤土 | | | | | |
| 粘土 | | | | | |

我国五十年代和苏联曾经广泛地使用了聂斯切洛夫（В.Г. Нестеров）的综合指数法。他着重考虑了气温、空气湿度和降水等因子对森林燃烧的影响，提出以日降水量大于3毫米的两次降水之间的逐日气温和湿度饱和差两者乘积的累加值为综合指数，即 $P=\sum_{1}^{n}(Td)$，式中P为森林燃烧性综合指数；n为降水以后的天数（无雨的天数），T为当日14时的气温，d为当日14时的空气饱和差。据经验，将不同的综合指数分别划分为不同火险等级，因此，对于一段时期逐日T、d的预测，即可得知不同日期气象条件所达到的火险级别，及时采取不同等级的防火措施。

长期以来经过各地对聂氏方法的广泛使用后发现，该法有不足之处。（1）从选择相关气象因子上，气温和饱和差不一定是与森林火灾相关性最强的因子，例如在北方，风速、日照以至高空气象要素的变化均对地面有一定影响；南方林区14时气温也未必与林火的发生率成正相关。（2）聂氏法没有考虑地被物和林分的可燃性特点对火情发生和蔓延的影响。（3）聂氏法当气温≤0℃时无法应用，而北方林区冬季14时气温小于0℃时，仍有火险发生的情况。因此近年来各地根据当地的经验提出了一些森林火险指标及其预报方法。兹列三例如下：

（1）801法系黑龙江省森林保护研究所段秀英等（1982）提出。以森林火灾天气指标（$FFW_1$）为主，以火灾发生系数(C)和植被调整指标（K）为辅的三个计算系统组成，认为每天被保护区的火灾危险等级（FDR），等于森林火险天气指标加以相应的植被调整指标乘以火灾发生系数。其表达式为：

$$FDR = C\cdot(FFW_1 + K) \qquad (8.19)$$

根据实况统计，他们得出发生火灾的天气条件与每天14时的气温（T）、相对湿度（H）、风速（V）、日降水量（R）具有如下关系：

$$FFW_1 = 1 + 1.5T + 52.8e^{-0.05H} + 4.0V^{0.52} + 52.8e^{-0.05H_0}\cdot e^{-24R} \qquad (8.20)$$

式中，H.为前一天14时的相对湿度。这样只要预报出每天14时的T,H,V,R值，就可以得出$FFW_1$，指标值域0—100。根据10年的实况分析，得出了森林火灾天气指数与火灾发生率的相应关系，表8.11中P(F)为平均日火灾发生概率，P(Fb)为平均日大火灾发生概率。

**表8.11　天气火险等级表**

| $FFW_1$ | P(F)(%) | $P(F_b)$(%) | 危险状况 | 预防措施 |
|---|---|---|---|---|
| 00—20 | 0 | 0 | 无危险 | 正常工作 |
| 21—40 | 5 | 0 | 很少危险 | 正常工作 |
| 41—60 | 15 | 5 | 中度危险 | 正　常 |
| 61—80 | 30 | 25 | 高度危险 | 加　强 |
| 81—100 | 50 | 75 | 极危险 | 发布紧急预防命令 |

森林火灾天气指标反映的是火灾发生的危险程度，每天是否发生还取决于火源是否出现。而火源的数量因被保护区内火源数量的差异分为三级（表8.12）得出三个火灾发生系数c。但是同一d域在不同月份的c是不等价的，因此c值需要每月相应更换一组（根据经验实况统计，每五年修订一次）。

**表8.12 按照火源数量（以火灾发生率d表示）确定火灾发生系数c的换算**

| d | c |
|---|---|
| 0.01 | 0.90 |
| 0.01—0.49 | 0.90 |
| 0.50—1.00 | 1.00 |

在相同的$FFW_{i}$下，植被状况不同，火灾发生率不同，最低限度需对植被的干枯、黄、青、绿等状况区别对待，据经验得出植被状况的换算指标列于表8.13。

**表8.13 植被调整指标（K）**

| 植被状况 | K 值 |
|---|---|
| 干、枯 | 0 |
| 青、黄 | −5 |
| 绿 | −10 |

801法可用计算机计算，也可用预先准备好的指标查算表计算。据报导，预报准确率在70%以上。

（2）火险指标法系吉林省辽源县林业局韩英材（1982）提出。根据当天的气象实况，确定其相当于火险指标的等级，加上对次日气象因子的预测修正，以预报次日的森林火险等级。公式也是由经验资料统计比较得出，包括两个步骤：

①当日实际的火险指标$H_T$计算式为

若平均风速小于0.3米/秒时

$$H_T=\sum_{1}^{n}(U\cdot d_{14}+\overline{T}\cdot R) \qquad (8.21)$$

若平均风速大于0.3米/秒时

$$H_T=\sum_{1}^{n}(U\cdot d_{14}+\overline{T}\cdot R+\overline{T}\cdot R\cdot\overline{V}) \qquad (8.22)$$

式中，U为蒸发量，$d_{14}$为14时空气湿度饱和差，$\overline{T}$为平均温度，$\overline{V}$为

平均风速，R为降水常数，n为降水量小于2毫米的连续天数。为了避免聂氏法无法计算低于0 ℃情况的缺点，这些算式中都采用华氏温标（°F）。

② 预报次日火险指标（Hy）的计算式为

$$H_y = H_T + T_{min} \cdot R \cdot F_{max} \quad (8.23)$$

式中，$F_{max}$为预计次日的最大风速（米/秒）。

由于都是经验式，各气象要素的数值域有一定限度，超出限度将很不准确。为此又规定了一些计算条件：(a) 当U＝0时，则将U弃去，只考虑$d_{14}$；若$d_{14}$为0时，则弃去$d_{14}$，只考虑$u_0$。(b) 降水常数以0毫米为10，0.1—1.0毫米为9，依此类推降水量8.1毫米以上时均为1。

最后确定五个火险等级（表8.14）。该法在预报Ⅲ级以上的森林火险时有85%的准确率。

**表8.14 森林火险等级确定**

| 火险指标 H | 火险等级 |
|---|---|
| <4000 | Ⅰ |
| 4001—8000 | Ⅱ |
| 8001—12000 | Ⅲ |
| 12001—16000 | Ⅳ |
| >16001 | Ⅴ |

（3）着火指标百分数评分法系宋宝纯等（1980）在小兴安岭林区防火研究中提出。在一定地被物条件下，其可燃性主要决定于最高气温、最小相对湿度和某降水量以后的连旱日数。根据实况经验分别将以上要素分为少燃或不燃、能燃、易燃、最易燃四个等级，并对各要素级在着火上的作用给予评分(表8.15)。综合气象要素的着火指标Z值按下式得出，查火险等级表(表8.16)

$$Z = T + r + R(R_1,\ R_2或R_3任一个) \quad (8.24)$$

确定危险性。有了着火的可能性还不等于森林火灾就大，因而又

**表8.15 着火指标百分数变量**

| 可燃情况 | 最高气温T | | 最小相对湿度r | | 降水量0.1—2.0毫米以后$R_1$ | | 降水量2.1—2.5毫米以后$R_2$ | | 降水量>5.1毫米以后$R_3$ | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 要素值℃ | 评分(%) | 连旱日数 | 评分(%) | 要素值 | 评分(%) | 连旱日数 | 评分(%) | 连旱日数 | 评分(%) |
| 少或不燃 | <12.0 | 5 | ≥41 | 5 | 当天 | 0 | 1 | 5 | 1—2 | 5 |
| 能燃 | 12.1—15.0 | 15 | 40—33 | 15 | 1 | 10 | 2 | 10 | 3 | 10 |
| 易燃 | 15.1—18.0 | 25 | 32—26 | 25 | 2 | 20 | 3 | 20 | 4 | 20 |
| 最易燃 | >18.0 | 35 | ≤25 | 35 | >3 | 30 | >4 | 30 | >5 | 30 |

**表8.16 Z值火险等级**

| 火险等级 | 不危险 | 一般危险 | 危　险 | 最危险 |
|---|---|---|---|---|
| Z值(%) | 0—30 | 31—50 | 51—70 | 70—100 |

**表8.17 火险蔓延指标范围**

| 火蔓延级 | 不会或可能蔓延 | 能蔓延 | 易蔓延 | 极易蔓延 |
|---|---|---|---|---|
| 风速(米/秒) | 0.0—1.5 | 1.6—5.4 | 5.5—7.9 | >8.0 |
| 风　　级 | 1 | 2—3 | 4 | >5 |

需根据风速来预报火的蔓延指标（表8.17）。

总之，由于森林火灾的影响因素涉及面很广，到目前为止，尚未找到一个成熟的统一方法，以上的几种方法，其效果有待进一步检验。各种方法思路虽然不同，但也有几点相似。例如，都是经过对实况历史资料分析以后的结果；都是找出主要相关因子然后确定其数量级确定火险等级等等。森林火险预报有不同时效，这里介绍的都是短期预报，因为短期预报的作用最大，并且在森林防火期内需要每天都做。在我国现有条件下，森林火灾预报还要注意计算简便、快速的特点。我国开展森林火灾预报的时间

比较短，基本资料积累较少，增加了开展这一课题研究和应用上的困难。

## 二、其他林业气象灾害

前面几章中都提到一些农业气象灾害，其中不少也是林业气象灾害。本节不再赘述，只作些补充。

就温度过高过低来说，生长发育旺盛的树木对极端温度十分敏感。特别在能危害树木的温度骤然出现时，危害往往更加严重。温度过高会使树木遭受皮烧、灼伤甚至干枯死亡。温度过低，会使树木遭受寒害、霜冻害和冻害。危害程度因树种的本性、地区和季节而定。

各种形态降水过多过少都能危害树木的生长发育。降水过少易致干旱。雪大能造成林木雪压、雪折、雪倒。有时也会冻伤植株，妨碍生长。露凇常使林木造成机械损伤。冻雪能打伤新芽嫩枝，击落花果，毁坏幼苗幼树。

风速超过10米/秒的大风对林木能产生破坏作用。在强风袭击下，浅根树种能连根刮倒，称为风倒。能被强风吹折树干称为风折。当然，风折风倒能否发生决定于风的强弱、持续时间和树种的抗风能力。

森林病虫害的发生以至大发生往往需要一定的温度、湿度条件。而防治时也需要选择适宜的天气条件才最有效。

## 参考文献

〔1〕中国科学院农业现代化委员会编，农业发展战略学术论文集，科学出版社，(1982)。

〔2〕中国科学院地理研究所经济地理研究室编，中国农业生产布局，农业出版社，(1983)。

〔3〕云南大学生物系编，植物生态学，人民教育出版社，(1980)。

〔4〕中国科学院林业土壤研究所编辑出版，杉木人工林生态学研究论文集，(1980)。

〔5〕王正非等，树冠下红松育苗与小气候效应，林业集刊，（2），(1959)。

〔6〕卢其尧，热带地区林内和林外的能量平衡与小气候效应，林业科学，9(1),

(1964)。
〔7〕贺庆棠，刘祚昌，森林的热量平衡，林业科学，科学出版社，16(1),(1980)。
〔8〕崔启武、朱劲伟，林冠的结构和光的分布——光的透射和反射理论，地理学报，科学出版社，36(2)，(1981)。
〔9〕朱劲伟、崔启武，林冠的结构和光的分布——光的吸收的理论的探讨，林业科学，科学出版社，(31)，(1982)。
〔10〕朱劲伟等，森林的水量平衡，中国科学院林业土壤研究所编辑出版，(1980)。
〔11〕中国农学会农业气象研究会和中国林学会编，林业气象论文集，气象出版社，(1984)。
〔12〕侯学煜，生态学与大农业发展，安徽科学技术出版社，(1984)。
〔13〕王正非、朱廷曜等，森林气象学，中国林业出版社，(1985)。
〔14〕Richard Lee，森林小气候学（姚启润等译），气象出版社，(1986)。
〔15〕刘清泉，森林树木与生态环境，山西科学教育出版社，(1985)。
〔16〕A.P.Константинов等,林带与农作物产量（闻大中译），中国林业出版社，(1983)。
〔17〕J.L.Monteith等，植被与大气—原理（卢其尧等译），农业出版社,(1985)。
〔18〕朱震廷等，中国北方地区的沙漠化过程及其治理区划，中国林业出版社，(1981)。
〔19〕《经济研究》杂志编辑部和《农业经济问题》杂志编辑部编，论生态平衡，中国科学出版社，(1983)。
〔20〕WMO, Symposium on Forest Meteorology, Canadian Forestry Service, WMO.NO—527, (1979).
〔21〕American Meteorological Society, Sixth Conference Biometerology & Aerobiology and 16th Conference Agriculture & Forest Meteorology, A.M.S. (1983)。

# 第九章　畜 牧 气 象

畜牧业是人类获取食物（肉、蛋、奶等）、工业原料（皮、毛、鬃、骨等）、生活物质(皮、毛、绒等)和动力（乘、挽、役等）的一个重要部门，国外称之为动物生产。畜牧业的发展是农业现代化的标志之一。世界上经济比较发达的国家，畜牧业在农业中所占的比重一般都在50%以上，有的甚至高达90%以上。我国的自然条件，特别是气候条件决定了我国畜牧业的适应范围极为广阔，草地资源、饲料资源和畜禽资源都十分丰富。但畜牧业发展水平却很低，与国外先进水平及现代化建设要求相比，差距很大。

畜牧业生产与气象条件之间的关系极为密切。气象条件直接影响着畜禽的生长发育、疾病发生与发展、地理分布以及畜产品的产量与质量、贮藏与运输，还通过影响牧草和饲料作物对畜牧业产生间接影响。作为牧业学科的基础、农业气象重要组成部分的畜牧气象，即旨在研究并揭示畜牧业生产与气象条件之间的关系与规律，为畜牧业合理布局、引种育种、有效地改善畜舍小气候、饲料与牧草生产、疫病防治、科学地饲养管理及防御畜牧气象灾害提供科学依据。

## §1　草原、牧草与气象

### 一、草原分布与气候

气候条件（其中最主要的是热量和水分）通过对生物和非生物的影响，使草原现象表现为地带性，包括纬度地带性、经度地带性和垂直地带性三个方面。不同地区，因气候条件的差异，形成了不同的草场类型。所谓草场的气候类型，就是指在一定气候条件下形成的牧草种群结构、形态特征、经济性状等比较一致的

草场类型。按各地光、热、水条件与草原植被状况，可将我国天然草场分为四大气候类型：

（1）温凉—寒冷湿润、半湿润草甸草场　包括内蒙古呼伦贝尔盟北部和锡林郭勒盟东北部的温带草甸草场；陇南、甘南高原及祁连山中东段，新疆阿尔泰山区、天山西部巩乃斯草原的东部和南部，青海果洛、玉树、海南、黄南等自治州的大部，西藏中部拉萨、南部日喀则和北部那曲地区的温带、高原温带、高原亚寒带草甸草场；四川西部、西藏东部、云南西北部的高原温带、高原亚寒带森林、灌丛草甸草场以及西藏、四川、青海、吉林、辽宁、黑龙江、内蒙古等地的隐域性河滩，湖滨季节性沼泽草甸草场等。这些草甸草场在我国北部、西部牧区，主要分布在海拔1000米以下，新疆天山等地可达3500米左右，在青藏高寒牧区多分布于3500—4500米之间，不同地区草甸草场的气候条件差异很大，导致产草量与牧草品质的不同（表9.1和9.2）。

（2）温凉—寒冷半干旱草原草场　是草甸草场和半荒漠草场的过渡类型，又称为干草原或典型草原草场。它包括黑龙江西南部、吉林西北部和辽宁北部的松嫩草原大部，内蒙古锡林郭勒草原东南部、伊克昭盟东部，宁夏西、海、固地区的大部，陇东北部和陇中大部，青藏高原北部，新疆阿尔泰山、准噶尔西部山区、天山山麓地带、昆仑山北坡以及河北坝上和山西、陕西北部的温带草原草场；西藏日喀则地区北部、那曲地区西部和阿里地区东南部的高原温带、高原亚寒带草原草场等。这些草原草场在黄河河套以东，多分布在海拔1000米以下，向西迅速升高，天山南坡的亚高山草原可到2800米，青藏高原达4000—5000米。干旱草场的严寒比草甸草场轻，但干旱严重，因此牧草产量东部略高于西部，品质则西部优于东部。各地区的气候条件及生产力也有较大差异。

（3）温暖—严寒干旱半荒漠草场　这类草场水份条件比草原草场更差，包括内蒙古高原中西部和鄂尔多斯高原西部、宁夏

表9.1 草甸草场的气候条件与牧草产量

| 地点 | 生长季（日平均气温>0 ℃） | | | | | 越冬期（<0 ℃） | | | 牧草 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 日数（天） | 积温（℃） | 最热月平均气温(℃) | 降水量（毫米） | 湿润度 | 日数（天） | 最冷月平均气温（℃） | 年极端最低平均温度（℃） | 代表种类 | 草层高度（厘米） | 鲜草产量（公斤/亩） |
| 额尔古纳右旗 | 173 | 2163 | 18.3 | 317 | 0.68 | 192 | −27.7 | −41.4 | 羊草、贝加尔针茅、披碱草、黄花苜蓿、无芒雀麦 | 60—80 | 250—500 |
| 昭苏 | 206 | 2216 | 14.6 | 450 | 0.68 | 159 | −12.1 | −28.3 | 高山早熟禾、草地看麦娘、苔草、老鹳草、三叶草 | 40—70 | 250—500 |
| 祁连 | 196 | 1698 | 12.8 | 376 | 0.76 | 169 | −13.6 | −27.8 | 多种蒿草、早熟禾、羊茅、垂穗披碱草、黄芪 | 20—40 | 150—250 |
| 碌曲郎木寺 | 196 | 1418 | 11.0 | 708 | 1.78 | 169 | −9.6 | −24.5 | 蒿草、异针茅、披碱草、苔草、短柄草、珠芽蓼 | 20—50 | 200—400 |
| 丁青 | 216 | 1794 | 12.0 | 620 | 1.22 | 149 | −7.0 | −20.6 | 蒿草、紫花针茅、羊茅、早熟禾、圆穗蓼、萎陵菜 | 40—60 | 200—350 |
| 理塘 | 218 | 1650 | 10.5 | 680 | 1.39 | 147 | −6.0 | −22.6 | 蒿草、野青茅、苔草、野古草、披碱草、火绒草 | 30—50 | 150—250 |

（引自《中国牧区畜牧气候》）

**表9.2　草甸草场气候条件与牧草营养成分的关系**

| 牧区 | 生长季 | | | 营养成分（占干物质的%） | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 光合有效辐射（$10^5$焦耳/厘米$^2$） | 月平均气温（℃） | 降水量（毫米） | 粗蛋白质 | 粗脂肪 | 无氮浸出物 | 粗纤维 |
| 北部 | 1.457—1.500 | 3—18 | 350—400 | 10.76 | 3.30 | 46.95 | 25.90 |
| 西部 | 1.157—1.922 | 4—15 | 100—450 | 12.31 | 2.63 | 45.93 | 24.79 |
| 青藏 | 1.503—2.018 | 3—13 | 350—700 | 13.91 | 3.43 | 47.57 | 23.07 |
| 南方 | 1.775—1.926 | 6—29 | 1300—1400 | 9.44 | 2.43 | 45.48 | 20.08 |

（引自《中国牧区畜牧气候》）

中北部、祁连山沿山地带和陇中北部的温带干旱半荒漠草场；柴达木盆地东半部的盆沿地区和西藏阿里地区东北部的高原亚寒带、高原寒带干旱半荒漠草场等。在内蒙、宁夏、甘肃、新疆等地，多分布在海拔1500—2000米以下，青海、西藏地区则分布在4000—5000米之间。

（4）温暖—严寒极干旱荒漠草场　包括塔里木盆地至吐鲁番—哈密盆地、安敦盆地的暖温带极干旱荒漠草场；内蒙古高原西部、河西走廊、祁连山西段，准噶尔盆地和柴达木盆地中西部的温带极干旱荒漠草场；青海、西藏、新疆接壤地区昆仑山脉、可可西里山脉、阿尔金山脉以及藏北高原西北部的高原亚寒带、高原寒带极干旱荒漠草场等。这些地区最大特点是水分严重不足，草场植物以旱生、超旱生、沙生为主，产量很低。

根据不同地带（主要是垂直地带）的气候、饲草条件和家畜对生态环境的适应能力，按季节安排利用的山地草场为季节性草场，其形成取决于气候、地貌、植被、水文等自然因素。随着季节的变化，在气候、水文等条件适宜的地带，各自形成不同生态类型的草场植被，对发展季节性畜牧业具有重要意义。我国的季节性草场可以分为两种形式：

（1）两季草场　即冬春场和夏秋场，亦称冷季草场和暖季草场，主要分布在地形起伏不大、水热分配比较均匀的亚高山、高

山草甸草场地区。冷季草场多为高平原中的洼地、冬季有积雪的无水草场、宽谷盆地、山前平原以及河滨、湖滨、沼泽滩地等。它海拔较低，背风向阳，有利于家畜越冬渡春。暖季草场多为高平原上的台地、岗地和山地（包括中、高山），海拔较高，通风向阳，气候温和湿润，适宜于夏季放牧利用。需要指出，不同地区同一地形部位的两季草场利用时间完全不同（表9.3）。

**表9.3 两季草场的利用时间**

| 地区 | 暖季草场 | | 冷季草场 | |
|---|---|---|---|---|
| | 利用时间 | 天数 | 利用时间 | 天数 |
| 内蒙古高原大部 | 5月下旬—10月下旬 | 164 | 11月上旬—5月中旬 | 201 |
| 新疆塔里木河流域 | 6月上旬—10月下旬 | 153 | 11月上旬—5月下旬 | 212 |
| 青藏高原大部 | 6月上旬—9月下旬 | 122 | 10月上旬—5月下旬 | 243 |

（引自《中国牧区畜牧气候》）

（2）三季草场　即夏场、冬场和春秋场，是亚洲中部放牧畜牧业普遍利用的草场形式。因水、热的垂直变化十分明显，利用的季节性非常强。三季草场中夏场多为亚高山、高山和森林草甸；冬场处于海拔较低的河谷、坡地、台地、背风向阳的盆地和山地逆温层中；作为过渡性草场的春秋场，多在中低山区，气候有明显的过渡性。不同地区三季草场的利用时间见表9.3。

## 二、草原生态系统

### （一）草原生态系统的概念

草原生态系统是地球生物圈主要陆地生态系统之一，它是在一定的非生物环境中形成的、有一定结构的、以草本植物为主、有家畜或野生动物生存、以收获饲用植物和动物及动物产品为主要生产方式的农业生态系统的一个分支。草原生产和科学研究的核心，就是研究草原生态系统中能量与物质的转化规律，并提高其利用率。

与其它生态系统一样，草原生态系统具备四项基本功能，即

表9.4 三季草场的利用时间

| 地区 | 代表点 | 冬场 | | 春秋场 | | 夏场 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 利用时间 | 天数 | 利用时间 | 天数 | 利用时间 | 天数 |
| 西藏 | 索县 | 11月中旬—4月上旬 | 151 | 4月中旬—6月中旬<br>9月下旬—10月上旬 | 122 | 6月下旬—9月中旬 | 92 |
| 东北 | 丁青 | 11月下旬—4月中旬 | 151 | 4月下旬—6月中旬<br>10月上旬—11月中旬 | 112 | 6月下旬—9月下旬 | 102 |
| 天山北坡 | 沙湾 | 11月中旬—3月下旬 | 141 | 4月上旬—6月上旬<br>9月上旬—11月上旬 | 142 | 6月中旬—8月下旬 | 82 |
| | 乌鲁木齐 | 12月上旬—3月下旬 | 121 | 4月上旬—6月下旬<br>10月上旬—11月下旬 | 152 | 7月上旬—9月下旬 | 92 |

（引自《中国牧区畜牧气候》）

开放、适应、排序与反馈的功能。草原生态系统还具有这样一些基本特征：有一定的环境；有一定的界面；有一定的空间；有一定的组分；有一定的组合单元；有一定的能量、元素与信息流程；有外延趋势；有特定的生产格局；有一定的生产潜势。

（二）草原生态系统的主要成分

草原生态系统的主要成分包括四个方面（图9.1）：

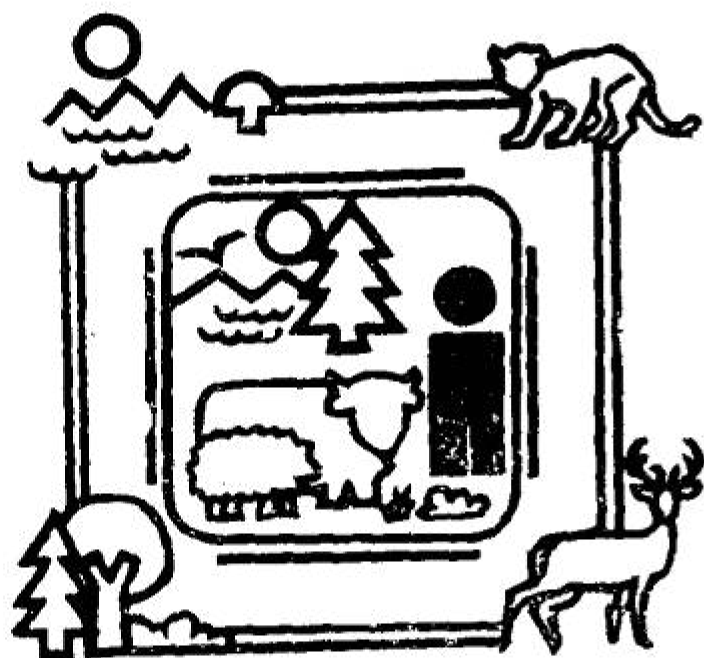


图9.1　草原生态系统示意图

（1）非生物物质　　无生命的环境成分，如水、光、氧、$CO_2$、有机化合物、土壤，营养元素如氮、磷、钾、钙和镁，以及微量元素如铜、钴、碘和铁等。

（2）有机物生产者　　草本植物，主要是禾本科和豆科牧草，其它绿色植物如阔叶杂类草和灌木，也能在某些草地群落中占优势地位。它们利用太阳能，将无机养分合成为有机化合物，既为其本身所用，同时又为有机物消费者提供食料。

（3）有机物消费者　　直接以植物为食物的动物（食草动物）为初级消费者，而以这些动物为食物的动物（食肉动物）为次级消费者。前者有反刍动物（包括牛、绵羊、山羊和鹿等）、非反刍动物（包括马、驴、兔子和草地野鼠）及多种昆虫、鸟类、啮齿动物和其它一些动物，后者有蛇、野狗及杂食性鸟类等。

（4）有机物分解者　　重要组成为微生物区系和动物区系，

包括土壤中腐生性微生物、昆虫、无脊椎动物和其它原生动物。蚯蚓和粪甲虫是草原生态系统中的重要分解者。

（三）草原生态系统中物质与能量转化流程

在草原生态系统中，从日光能及无机物转化为植物有机物（牧草）叫初级生产（过程），从牧草转化为动物产品叫次级生产（过程）。每个过程中包括了若干转化阶。从表9.5中可以看

表9.5 草原生产流程*

| 项目 | 转化率 | 低产（%） | 高产（%） |
|---|---|---|---|
| 日光能＋无机物 | | | |
| ↓ $R_1$ | ×1—2% | | |
| $P_1$ 植物生长量（总初级生产能力） | | | |
| ↓ $R_2$ | ×50—60% | 50 | 60 |
| $P_2$ 可食牧草（净初级生产能力） | | | |
| ↓ $R_3$ | ×30—80% | 15 | 48 |
| $P_3$ 采食牧草 | | | |
| ↓ $R_4$ | ×30—80% | 10.5 | 38.4 |
| $P_4$ 消化营养物质 | | | |
| ↓ $R_5$ | ×(0)60—85% | 0—4 | 32 |
| $P_5$ 动物生长量 | | | |
| ↓ $R_6$ | ×0—50% | 0—2 | 16 |
| $P_6$ 可用畜产品（净次级生产能力） | | | |

* 表中 P ——物质贮存形态，R——转化率，$R_1$——植物光能利用率，$R_2$——可采食率，$R_3$——实际采食率，$R_4$——消化率，$R_5$——动物有机体转化率，$R_6$——畜产品利用率。（任继周等，1978）

出，至少要经过六个转化阶段才能达到净次级生产能力，即可用畜产品。从$P_1$到$P_6$的多种物质贮存形态和多阶转化，最后得到“可用畜产品”，这便是草原生产能力转化的全部过程，也是草原生态系统中生产流程的全过程。根据上述流程，人类能直接利用的畜产品，即净化次级生产能力（$P_6$）可用下式算出：

$$P_6 = R_1 \times R_2 \times R_3 \times R_4 \times R_5 \times R_6 \qquad (9.1)$$

若以$R_1$定为一个常数（k = 100），根据现有生产技术水平计算，$P_6$通常只有1—2%或更低，世界先进水平也不超过16%。这说明从植物生产到畜产品收获，这个生产程序的物质转化流程，漏洞很多，损耗很大。在通常情况下，98%以上漏掉了，没有物质生产意义。畜牧气象工作者的重要任务之一，就是根据草原生态系统的结构特点，最大限度地提高牧草光能利用率与转化效率，提高草原生产潜力。

## 三、牧草与气象

### （一）牧草的生态气候型

按照牧草对不同气候因子的要求和反应，可得出不同的生态气候型。

按照对光照条件的要求与反应，可把牧草分成（1）喜光型（阳性）植物，在全光照或阳光充足的条件下同化作用增强，生长旺盛。如紫花苜蓿、红三叶草、梭梭柴、冰草、无芒雀麦、芦苇等；（2）喜阴型（阴性）植物，对光的要求低，能在荫蔽的环境中生长，同化作用只能在较弱的光照中进行，光照增强，可能引起同化作用的减弱，如酢浆草、紫堇、苔藓植物等；（3）耐阴型植物，对光照要求不高，可适应各种不同程度的光，如鸡脚草、鸭茅、三叶草、早熟禾等。

按照对温度条件的要求与反应，可把牧草分成（1）喜温型，多原产于低纬度地区，对温度的要求较高，如芦苇、紫云英、迟速三叶草、非洲高粱、苏丹草、牧草大豆、鹰嘴豆和蚕豆等；（2）喜凉型，多原产于高纬度或高海拔地区，对温度的要求较低，如

燕麦、无芒雀麦、羊草、沙打旺和紫花苜蓿等，（3）温凉型，对温度的要求介于上两类之间。如猫尾草、牛尾草、鹅观草、驴豆草和箭筈豌豆等。

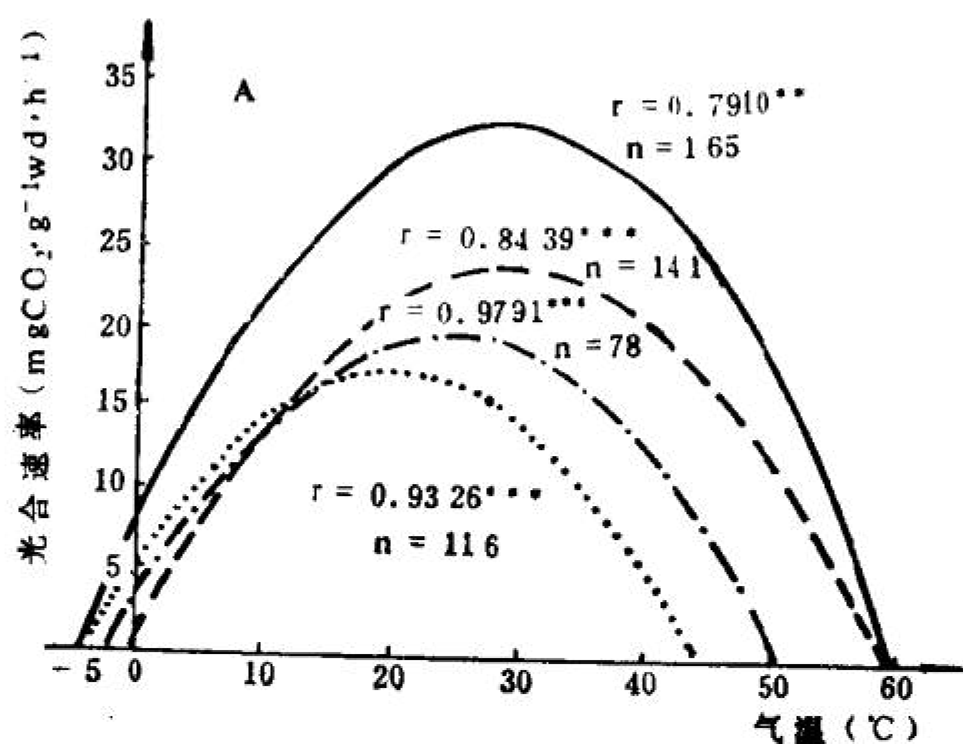
按照对水分条件的要求与反应，可把牧草分成(1)湿生型，适宜于潮湿地区，对干旱十分敏感，多生长于东北三江平原、小兴安岭周围和沼泽地及沿河、沿湖地区，这种类型又可分为阴性湿生型（如膜蕨、泥炭藓）和阳性湿生型（如苔草、藨草、灯芯草、香蒲及芦苇等）；（2）旱生型，生长于干燥环境，抗旱性强、适应性广但适口性较差，多生长在内蒙古、宁夏和甘新等地。如针茅、羊茅、蒿类、沙漠鹅观草等；（3）中生型，介于上两类之间，是草甸植被的主要植物，如猫尾草、牛尾草、紫花苜蓿、三叶草、鸡脚草、鹅冠草、苏丹草、蒲公英及早熟禾等。

（二）牧草产量形成与气象条件

牧草产量形成的过程，即其生物量累积的过程。分析牧草干物质增长的动态规律及其与气象条件的关系，是建立牧草生长模拟模式、进行牧草产量预报的基础。

1. 环境条件对牧草光合、呼吸作用的影响

植物光合作用是物质生产的基础，净光合作用的强弱决定了生物量的增长。环境条件，尤其是光、温、水、$CO_2$条件对植物光合、呼吸作用影响很大。试验研究表明，在干草原地区，光照强度一定时，温度和土壤水分状况是牧草光合作用最主要的影响因子，各因子影响大小因牧草种类不同而不同。图9.2为在中国科学院内蒙古草原生态系统定位站的试验结果。显然，温度对光合作用的影响符合一般规律，但两种牧草及其在不同土壤水分条件下，对温度的反应有所差异（图中Kt，为光合的温度系数，即温度每增加1℃，光合速率的变化量，单位为$mgCO_2g^{-1}$干重·$h^{-1}℃^{-1}$）。进一步研究表明，光合速率与土壤水分的关系呈指数函数关系（图9.3，图中Ks为光合的土壤水分系数，指土壤贮水量每增加1毫米光合速率的变化量，单位为$mgCO_2g^{-1}$干重·



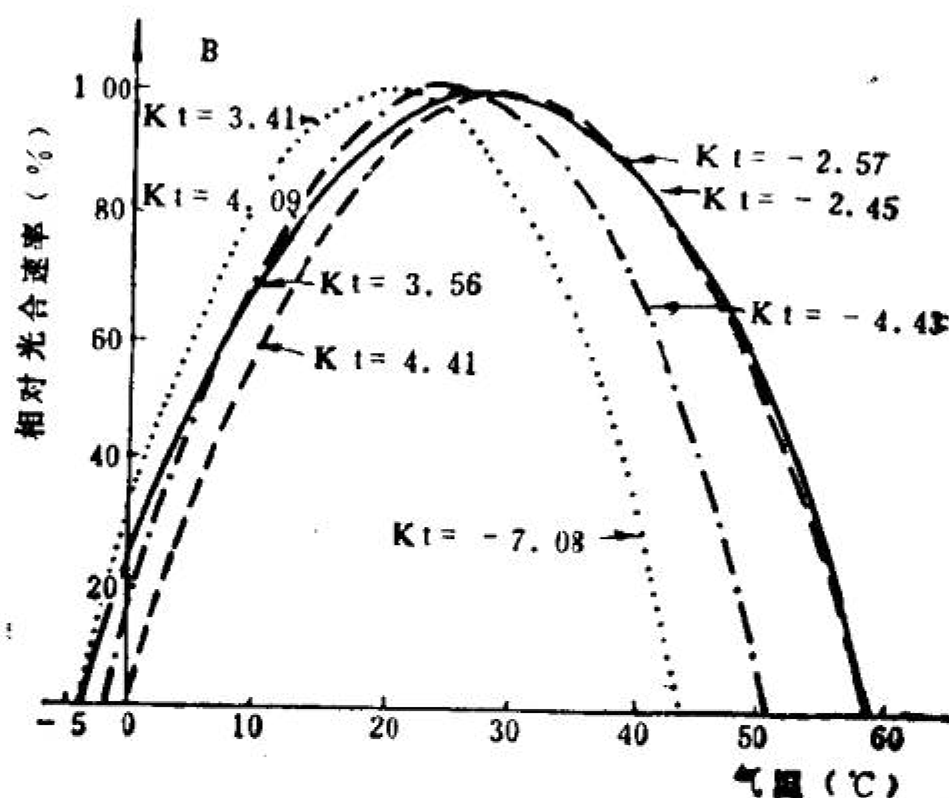




图9.2 羊草和大针茅的温度-光合速率曲线

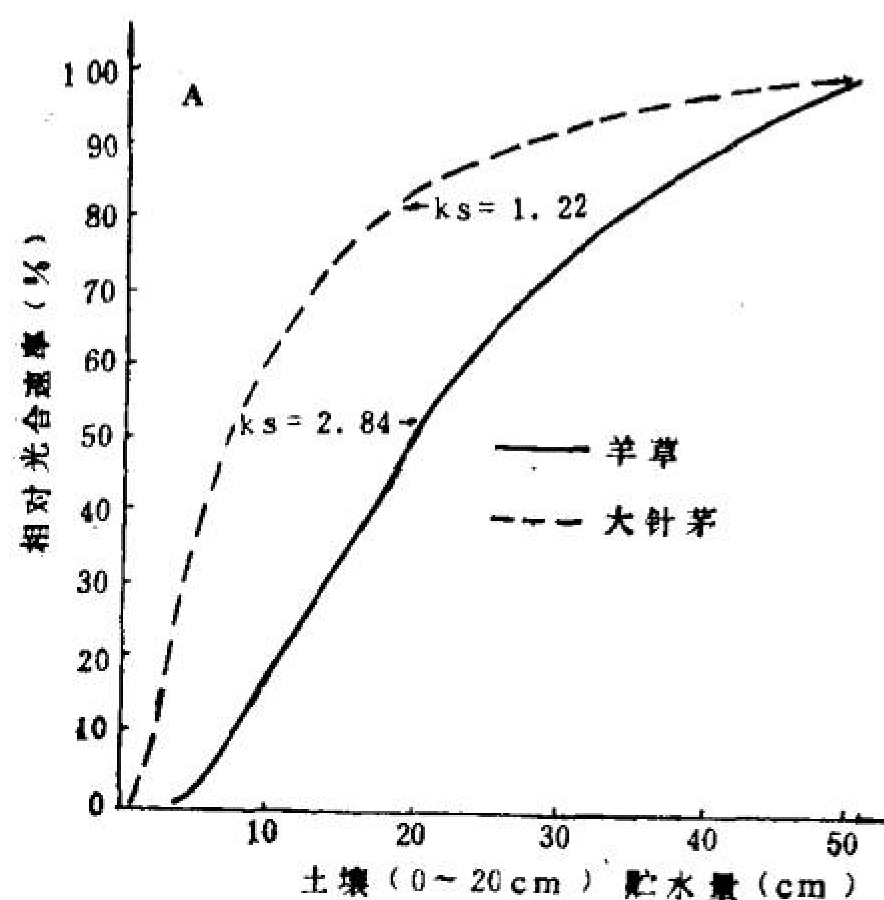
（Kt：光合的温度系数（8月中旬测定）（杜占池等，1988）

________羊草、土壤水分充足

............羊草、土壤干旱

— — — —大针茅、土壤水分充足

—·—·—·—大针茅、土壤干旱）



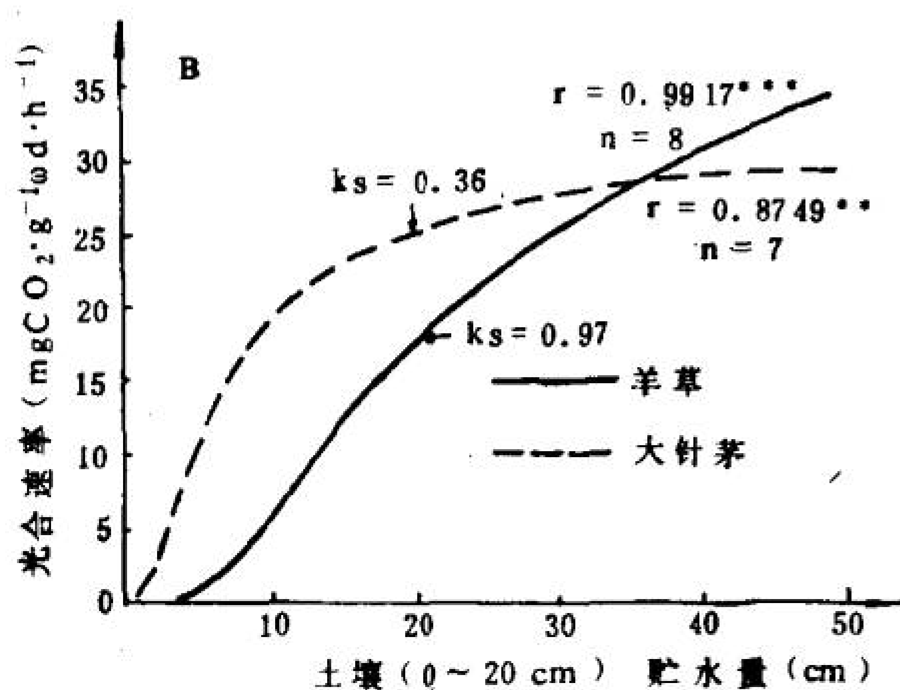




图9.3 羊草和大针茅光合速率与土壤水分的关系
（ks：光合的土壤水分常数（7月中旬测定）（杜占池等，1988）

$h^{-1} \cdot mm^{-1}$）。

温度是影响牧草呼吸速率的主要因子，图9.4为羊草群落暗呼吸日进程与气温变化关系图。

土壤干旱条件下，晴天牧草光合作用有“午休”的现象，其

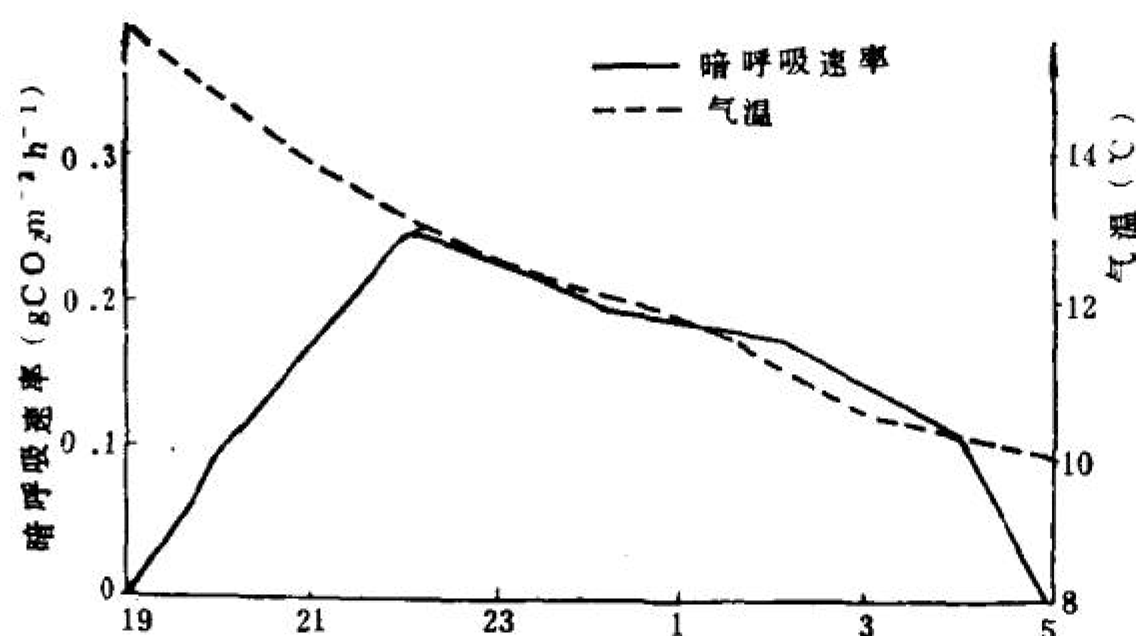



图9.4　羊草群落暗呼吸速率日进程与气温关系
（1982年7月测定）（盛修武等，1988）

主要原因是叶片含水量和气孔开启度的减小，光呼吸速率的升高和光合产物的积累也有一定的影响。在草原地区，增加土壤水分是减轻光合作用午间降低的有效途径。

2．牧草干物质增长动态及其与气象条件的关系

多年生牧草开春时发育很弱，地上部的积累不多。牧草抽穗到现蕾是干物质增大显著之时，表现为茎叶显著增长。开花中期至末期(少数在结实期)，积累的干物质量最大。生长末期则由于叶子和种子的大量脱落而使地上部干物质重量下降。这是天然牧草产量动态的一般规律，但不同地区、不同草场类型有一定的差异（图9.5）。戚秋慧等（1985）于1980年分析了羊草草原群落生物量的季节变化及相应的水热条件，得到5月中旬到6月中旬增长较迅速，其相对生长率(RGR)最高达0.0315g/g·d，这与此段时间气温回升较快（从返青的11℃增至17.4℃）和土壤底墒较好有关。但进入6月下旬到7月，生长显著变缓，甚至近于停滞状态，RGR大大降低，这主要是由于6、7两月降雨特少（两月只有58.2毫米），气温不断升高以及土壤底墒日益变干所致。进入8月有30.8毫米的降水，RGR又有回升，生物量稍有增加，至8月底增长到高峰，达126.88克/米$^2$。其后降水稍有增加，但终因气

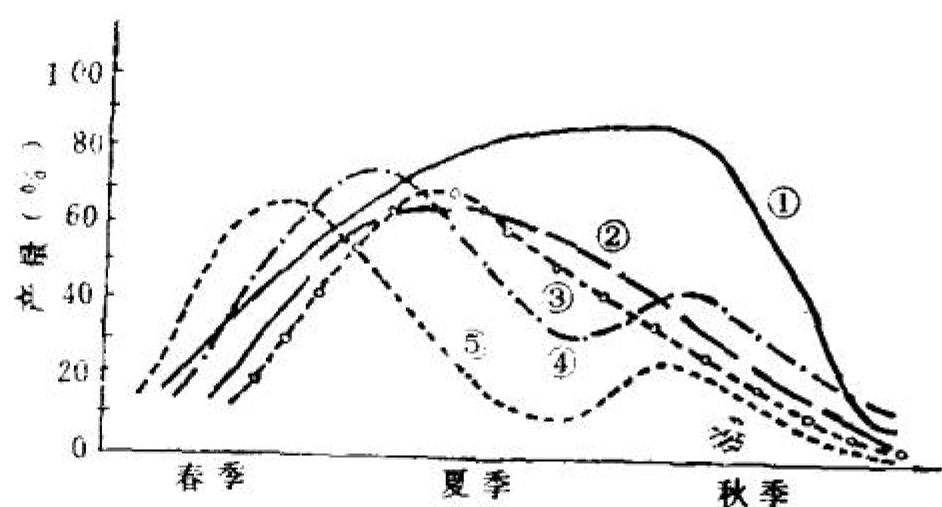



图9.5 不同草地牧草产量动态图示

① 草甸　　② 草原

③ 荒漠　　④ 荒漠草原

⑤ 短生荒漠

（引自北京农业大学主编《草地学》）

温下降和开始出现霜冻，植物趋向黄枯，生物量开始下降，RGR呈负值。羊草群落生物量的季节变化和生产力的高低受环境条件的影响很大，特别是降水。这也正是形成其年际变化的主要原因。根据张传道等（1986）对内蒙古不同草场类型的研究，气象因子在不同生育期有不同的效应，春季牧草返青至展叶期，光、热因子起主导作用，夏秋季节光、热条件基本能满足需要，降水则上升为主要的限制因子。

对牧草干物质积累进行模式化研究，是近年来牧草气象研究的重要内容。以色列的瓦兰切（D.Wallach）等（1976）将罗辑斯蒂（Logistic）方程引入天然牧草干物质积累的模式研究中，假定R（相对生长率）是时间t的函数，则

$$B(t) = K/[1 + \exp(D - \int_0^t R(t)dt)] \qquad (9.2)$$

式中，B(t)为t时刻的牧草生物量，K为最大生物量，D与初始生物量$B_0$有关：

$$\exp(D) = \frac{K}{B_0} - 1 \qquad (9.3)$$

R(t)的非线性形式很多，其中最常见的是S型函数形式：

$$R(t)=R_M/\{1+\exp[\frac{-C_V}{\Delta V}(V(t)-V_0)]\} \qquad (9.4)$$

式中，$R_M$，$C_V$和$V_0$为参数，V为环境变量，$\Delta V$为V的较差，$R_M$为最大相对生长率。研究表明，R是逐日太阳辐射、气温和土壤湿度的函数，但在不同地区各因子的影响程度不同。

澳大利亚的拜恩（G.F.Byrne）等（1976，1980）提出了牧草干物质增长的模式为：

$$\frac{dw}{dt}=[(c\alpha E_p-b)w-abw^2]/(1+aw) \qquad (9.5)$$

式中，w为t时刻的牧草干物重，$E_P$为蒸发器蒸发速率，$\alpha$为土壤有效水分含量，a，b，c为依品种而定的参数。其中a（公顷/公斤）反映了植物发育过程中，生长速率从指数规律变为常数时的生长速率，b（1/天）为维持呼吸系数，c（1/毫米）则反映了总光合量与蒸散量之间的关系，且a，b，c均为正数。对上式稍作变换，可得相对生长率的表达式：

$$\frac{1}{w}\frac{dw}{dt}=c\alpha E_P/(1+aw)-b \qquad (9.6)$$

3. 牧草产量与气象条件的关系

不同地区、不同年份和不同季节，由于气候条件的不同，牧草产量有显著的差异。对于地处干旱、半干旱地区的我国北、西部天然草场，降水条件（不同生育期的降水及总降水）往往起着决定作用。中国科学院内蒙宁夏综合考察队（1976）的考察结果（表9.6）充分说明了这一点。尤其是5，6月份的牧草需水关键期。据在新疆温泉县干旱草原草场上的测定，若以湿润年份的产草量为100%，则正常年份为50.7%，干旱年份仅25—35%，而且降水量不同，造成的丰欠年产草量的差别，因草场类型不同而异，草甸草原约差1倍，干草原约差2倍，荒漠草原则约差4倍。在降水相当的情况下，温度高则产量高。

表9.6　不同类型草场的产草量与降水量的关系

| 草场类型 | 丰年 | | 平年 | | 歉年 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 降水量（毫米） | 产草量（公斤/公顷） | 降水量（毫米） | 产草量（公斤/公顷） | 降水量（毫米） | 产草量（公斤/公顷） |
| 草甸草原 | >400 | >1000 | 300—400 | 800—1000 | <300 | <800 |
| 干草原 | >350 | >800 | 250—350 | 600—800 | <250 | <600 |
| 荒漠草原 | >300 | >600 | 150—250 | 400—600 | <150 | <400 |
| 荒漠 | >100 | >300 | 50—100 | 200—300 | <50 | <200 |

另外，山体不同部位、不同坡向的气候条件，尤其是水热条件不同，往往也造成牧草产量的差异。

在分析牧草产量与气候条件关系的基础上，可进行牧草产量预报。游直方（1987）曾从影响牧草长势、产量的气象因子出发，建立了牧草产量的预报方程。苏联的一些农业气象学家也曾建立了适于不同地区的由降水量、积温值、土壤湿润深度等因子所决定的牧草产量预报方程。加拿大的塞利里奥（I.S.Selirio）等（1979）也从S型曲线方程出发，着重考虑了土壤湿度，建立了季节产量预测的模拟模式（称为SIMFOY）。

（三）气象条件对牧草品质的影响

牧草品质即指其营养成分，其中最为重要的是粗蛋白质、粗脂肪、粗纤维和无氮浸出物。

气候条件相似的同一草场类型，牧草种类不同，营养成分有很大差异；而气候条件不同的草场类型，即使同一种牧草、同一物候期，营养成分的差异也十分显著(表9.7)。不同地区、同一种牧草、同一物候期营养成分的差异，重要是气候条件不同造成的。

牧草营养成分随发育期和季节的变化也十分明显。从季节上看，夏、秋季节是牧草开花、结实期，营养成分含量最高，春季适口性好，但营养成分较差，冬季植株老化，纤维素增多，适口性和营养成分都差。认识这一问题对于确定适宜打草期十分重要。杨文义（1987）通过对内蒙锡盟天然牧草营养物质及水、

表9.7　牧草品质与气候的关系

| 草名 | 物候期 | 地点 | 草场类型 | 营养成分（占干物质%） | | | | 气候条件 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 粗蛋白质 | 粗脂肪 | 无氮浸出物 | 粗纤维 | 光合有效辐射（$10^5$焦耳/厘米$^2$） | ≥0℃积温（℃） | 年降水量（毫米） |
| 羊草 | 抽穗期 | 肃南 | 半荒漠 | 4.97 | 2.96 | 52.05 | 33.55 | 1.698 | 2330 | 230 |
| | | 锡林浩特 | 干草原 | 9.63 | 3.08 | 46.37 | 29.75 | 1.722 | 2725 | 270 |
| 西藏嵩草 | 营养生长期 | 若尔盖 | 沼泽草甸 | 12.60 | 3.91 | 36.64 | 29.14 | 1.782 | 1359 | 553 |
| | | 门源 | 高山草甸 | 11.26 | 3.35 | 47.15 | 33.67 | 1.722 | 1602 | 464 |

（引自《中国牧区畜牧气候》）

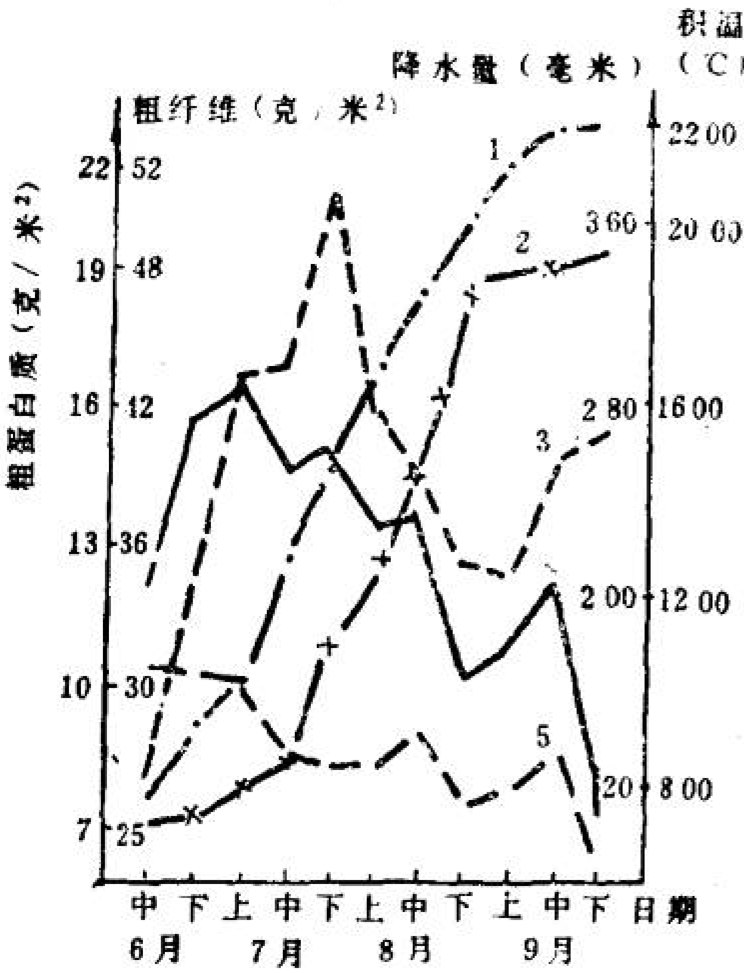



图9.6　草甸草原混合牧草营养物质及水热条件累积量

1. 4—9月≥5℃活动积温
2. 4—9月累积降水量
3. 粗纤维总收获量
4. 粗蛋白质总收获量
5. 粗蛋白质占风干物质%

热条件的分析（图9.6）认为牧草粗蛋白质总收获量在7月上旬即达到最高（16.4克/米²），此时营养价值较高，据此提出改革传统的打草制度（即变打秋草为打伏草）的建议。

（四）牧草收割、干燥及贮藏与气象条件

我国的草地，牧草生产存在着季节间的不平衡，表现为暖季(夏、秋)在饲草的产量和品质上明显优于冷季（冬、春），使畜牧业生产产生严重的不稳定,建立割草场,就显得十分重要。从割草场上刈割的牧草，其利用方式可

分为青饲、半干贮、普通青贮、通风干燥、田间干燥、干草粉等。如何选择适宜的刈割期及刈割次数，青贮、干燥过程中如何尽可能避免损失等，无一不与气象条件有关。

1. 牧草适宜收割期的气象条件

目前常见的牧草收刈期有三种，即（1）打伏草期，指从7月上旬到8月上旬（立秋以前），牧草处于抽穗、开花期，此期调制的干草为“伏草”；（2）打秋草期，从8月中旬到9月下旬（下霜以前），牧草处于结实期或种子成熟期，此期调制的干草为“秋草”；（3）打霜黄草期，10月上旬到11月上旬或更迟一些，此期牧草开始枯黄，但植株茎部仍保持绿色，调制的干草为“霜黄草”。其中以伏草最优。因此时所刈草营养价值比较高（图9.6），适口性好，且刈后牧草再生能力比较强。

适宜收刈期的选择，除决定于牧草产量与营养物质含量外，还必须考虑气象条件，因为将牧草调制成干草、青贮饲料，需靠草场里充分的光照条件，以使水分减少到20%（干草）或50%（青贮饲料）。如在牧草干燥过程中遇雨，则会使品质和收获量受到重大损失。一般割草的最晚时期应在牧草停止生长（秋季日平均3—5℃）前25—30天，以使牧草在越冬前有一个月时间积聚养分，供越冬和下一年恢复生长之用。

在使用机械割草时，当时的风力和风向可影响割草高度，从而影响牧草的产量。风力增加，割草高度也随之增加；顺风割草留茬高度较高，牧草损失大。据内蒙呼盟草原站的试验，当风力达到3—4级时，留茬高度保持在6—7厘米，牧草收获量比无风时损失15.2%；风力达4—5级时，留茬高度保持在7—8厘米，收获量损失26.5%；顺风割草则比逆风割草多损失10%以上的产量。

2. 牧草的再生性与气象条件

牧草再生性的好坏，是牧草生活力的一种表现，也是衡量其经济特性的一项重要指标。牧草再生性除受生物学特性制约外，还受环境条件的影响。

一般说，温暖潮湿会使草类再生旺盛，空气干燥、降水少会减少再生。由于不同地区的气候条件不一，同一种草在不同地区其再生性表现也不一样。如紫花苜蓿（播种第二年以后）在内蒙古、新疆、甘肃等无灌溉的干旱条件下，每年只能收割1次；而在有灌溉的条件下每年可刈割2—3次；在陕西、河北、山西等温暖而有灌溉条件的地区，每年可收3—4次。另外，土壤水分、养分以及土壤空气状况也影响牧草的再生性，如猫尾草，生长在贫瘠干燥的分水岭地带，再生性非常弱；而生长于富含腐殖质的已熟化的泥炭上则可刈割2～3次。土壤通透性良好，空气能达到分蘖节、根茎和根，则能加强牧草的再生。

3. 牧草干燥与气象条件

在草场上生长着的牧草含水约55—85%，调制成的干草（能够保藏）水分为15—18%，最多不能超过20%，为此，必须从植物体内散出大量的水分。刈后的牧草散失水分的过程可分两个阶段，（1）牧草刈割以后，起初植物体内的水分散失很快，且近保持匀速，此时失去的是牧草体内的游离水，在良好的晴天情况下，完成这一阶段（使牧草水分降低到45—55%）需要5—8小时；（2）当禾本科牧草含水量大约减少到40—45%，豆科牧草减少到50—55%时，干燥速度逐渐减慢，此期散失的是植物体中的结合水，完成这一阶段（使牧草含水降低到18—20%）则需1—2昼夜。牧草水分散失的一般规律可从牧草与空气水势变化角度理解。牧草的水分自高水势区流向低水势区，单位时间内植物体水分向大气方向的流动或失水速度（$J_w$），主要决定于植物的构造特性，它成为减慢饲草干燥速度的阻力，这些阻力的总和可用牧草的导水系数（$L_f$）表示，阻力越大，$L_f$越小。牧草干燥速度或失水速度主要决定于$L_f$及牧草水分势$W_{pf}$和空气水分势$W_{pa}$：

$$J_w = L_f \cdot (W_{pf} - W_{pa}) \qquad (9.7)$$

牧草中水分移动的阻力常随牧草的干燥而增加（牧草在干燥过程中$L_f$下降），因而水分散失的速度变慢，$W_{pf}$与$W_{pa}$趋于平

衡，这样就减少了水流量并减慢了$J_w$，只有当$W_{pf}$与$W_{pa}$差别增大时，才能保持$J_w$。空气温度与湿度决定了$W_{pa}$，因而对$J_w$有较大影响，一般较高的温度与相对湿度使$J_w$增大。

气象条件对牧草干燥速率的影响，国外的研究颇多。加拿大的戴尔（J.A.Dyer）等（1977）曾建立了牧草干燥的气候模式（PHAYD），其模式框图见图9.7。图中$M_n$为状态变量（受干燥速率和再湿速率的影响）指n天后牧草水分含量：

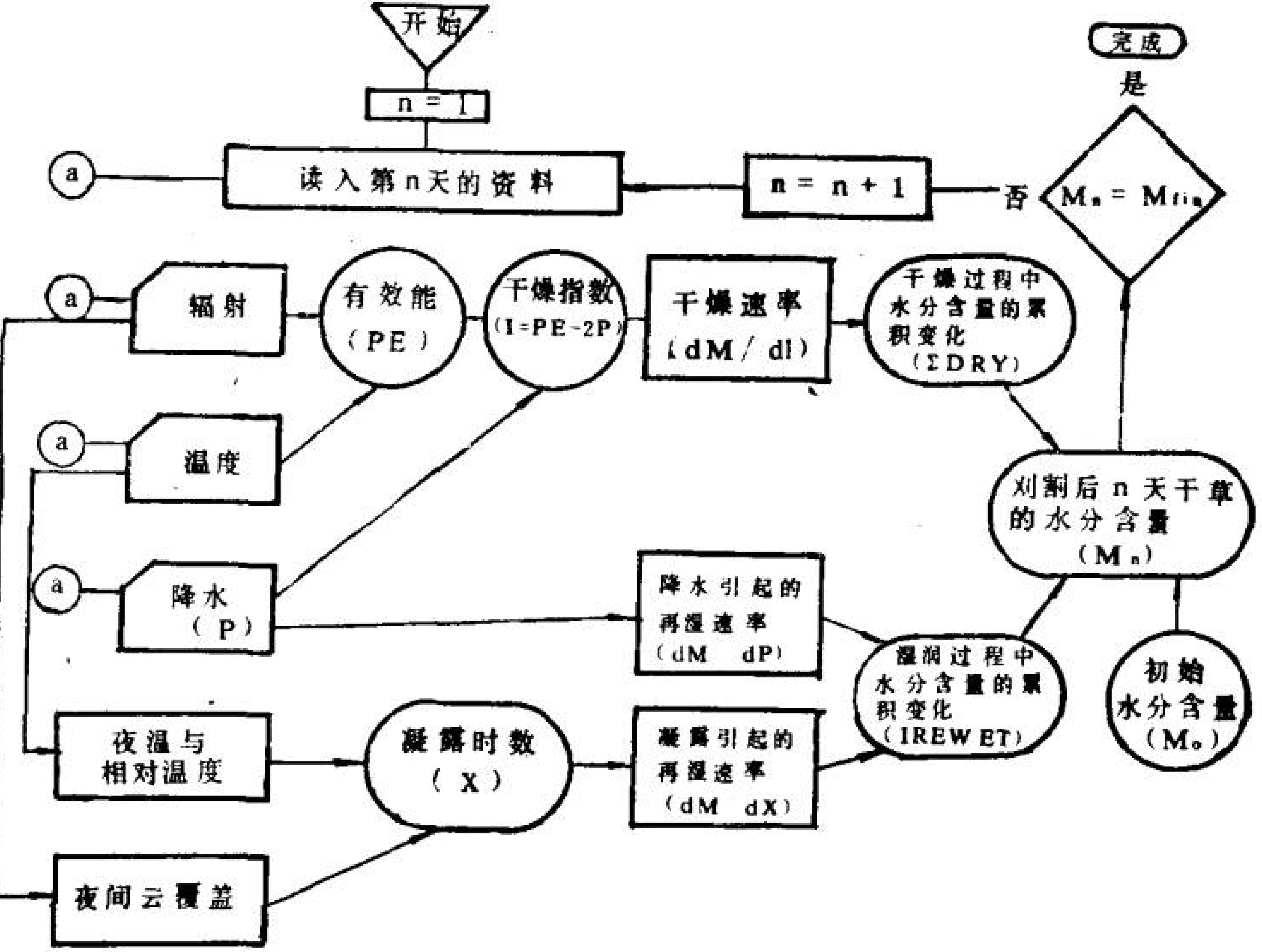



图9.7 显示输入气候资料和三个亚模式及其速率的田间牧草干燥模式（PHAYD）的流程图（J.A.Dyer等，1977）

$$M_n = M_0 + \sum_{i=2}^{n} REWET_i - \sum_{i=1}^{n} DRY_i \qquad (9.8)$$

式中，$M_0$为牧草收刈当天早上的初始水分含量，$M_{fin}$为最后水分含量，REWET和DRY为再湿与干燥项。PHAYD有三个亚模式，一个是确定干燥项(DRY)，另两个是确定再湿项(REWET)，

其中一由降水引起，另一由凝露引起。模式的输入资料包括逐日降水、日照时数和温度。经在不同气候区域验证，模拟效果较为理想。

牧草干燥过程中，营养成分也有变化，并有一定的散失。高温、高湿往往易使微生物活动加强，促使干草霉变；后期高温也能使有机物质消化率降低；雨、露淋湿作用也易引起可溶性营养物质（如磷、碳酸钠、碳水化合物等）的损失。

**四、人工草场建设与气象**

在畜牧业比较发达、集约化经营水平较高的国家，对人工草场的建设十分重视。人工草场面积占有相当大的比例，有的国家甚至超过了粮食作物和饲料作物的面积。如英国人工草场即相当于耕地面积的98%以上，而我国尚不到0.5%。长期以来，我国牧区受自然和人为因素的影响，草原面积缩小，草场生产能力很低，必须大力种草，建设人工草场。人工草场建设受气象条件影响较大。

仅就播种而言，适时播种不但能保证种子发芽所需要的温度和水分等条件，而且能使幼苗正常生长、发育以至成熟，同时也能避免不良的环境条件，如霜冻等的危害。因此确定适播期十分重要，并主要根据气象条件（如土壤水分、温度状况）而定。一般当春季土壤温度上升到种子发芽所需的最低温度时，即可播种。播种时期有春播（多用于一年生牧草或在土壤墒情、整地质量良好且风蚀不严重地方的多年生牧草）、夏播（多用于多年生牧草，因夏季雨季来临、土温升高，可避免春旱对种子发芽与幼苗生长的影响）、和秋、冬播（南方地区栽培牧草作绿肥时常用）。

选择牧草品种也应依据地区气候条件，如高纬度、高海拔的草甸草场，热量条件差、生长季节短，应选用垂穗披碱草、冷地早熟禾、糙毛鹅观草、星星草、无芒雀麦等喜凉牧草；低海拔草甸草场，水热条件较好，应选择优良豆科牧草；草原草场一般地势平坦、气候温和，多选用各种苜蓿、沙打旺以及羊草、无芒

雀麦、老芒麦、披碱草等；对于气候干旱的半荒漠、荒漠草场，则应选用抗旱性强的牧草，如苏丹草、沙打旺、野麦草、冰草、红三叶草等。

飞机播种是快速建设人工草场的一种先进方式，目前各种草场类型均有飞播成功的例子，但适时播种显得更为重要。另外，加强飞播期间的气象预报、利用有利的天气条件，是取得良好效果的重要保证。

**五、草原气候生产力估算与分析**

草原生产力包括初级生产力与次级生产力两个方面。这里讨论的是前一个问题。草原初级生产力的估算方法很多，其中有代表性的有两种，即（1）从草地蒸散与土壤有效水分入手，建立求算牧草干物质量的模式；（2）首先计算草地光合生产潜力，然后进行温、水条件订正。

莫桑比克的雷迪（S.J.Reddy）等（1987）利用莫桑比克四个地方（代表着四种不同气候类型）的气候资料，在比较了以前求算草原初级生产力的年降水量模式（试图描述初级生产力与年降水量之间的关系，并用某一修正因子或单独建立方程来表示不同土壤类型的差别）、生长季节模式与模拟模式（在土壤水分平衡的基础上，使用实际蒸散计算生长季节）的基础上，提出了一种适用于莫桑比克无灌从覆盖和地面平坦情况下的改进的模拟模式，该模式的主要输入资料包括年降水量（R，毫米）、年潜在蒸散量（PE，毫米）与土壤有效水分保持力（K，毫米）。其计算过程为：

第一步：用R和PE计算年有效降水量R′，

$$R' = (R/PE) \times 1800 \qquad (9.9)$$

第二步，用R′计算年实际蒸散AE，

$$AE = R' - RO \qquad (9.10)$$

RO为径流量（地表径流＋深层渗漏，毫米），计算式为：

$$RO = b\,(R'/100)^3,\ b = (15.2482/K^{0.4})$$

第三步，用AE求算总干物质产量（TDM，公斤/公顷·年），

$$\left.\begin{array}{l}
\text{i) 若AE}\leqslant 29\text{毫米，则}TDM_0=0 \\
\text{ii) 若}29<AE\leqslant 263\text{毫米，则} \\
TDM_{29}=[3.32(AE-29)] \\
\cdot\ [1.613\pm 0.613(F-1/25)^{\frac{1}{2}}] \\
\text{iii) 若AE}>263\text{毫米，则} \\
TDM_{263}=[777+6.26(AE-263)] \\
\cdot\ [1.613\pm 0.613(F-1/125)^{\frac{1}{2}}]
\end{array}\right\} \quad (9.11)$$

若F－1＞0，则取“＋”号；若F－1＜0，则取“－”号。F为过磷酸钙水平（公斤/公顷）。

中国牧区畜牧气候区划科研协作组（1988）计算了我国不同草场类型的光合产量与水热潜力，并作了分区分析。

1. 求算光合产量

根据前人研究成果，得到计算天然草场牧草光合产量的方法：

（1）设牧草青草期的光合有效辐射＝a（焦耳/厘米$^2$）。

（2）射入草层的太阳辐射漏射约占20%，反射占25%，牧草实际吸收的光合有效辐射b＝0.55a（焦耳/厘米$^2$）。

（3）光合有效辐射平均每焦耳的量子数是2.065微爱因斯坦，即c＝2.065×b（微爱因斯坦/厘米$^2$）。

（4）合成1微摩尔碳水化合物需要10微爱因斯坦的光量子，即d＝0.1c（微摩尔/厘米$^2$）。

（5）光合作用形成的碳水化合物，约有25%在呼吸中消耗，因此净光合产物为e＝0.75×d（微摩尔/厘米$^2$）。

（6）1微摩尔碳水化合物质量为30×10$^{-6}$克，故
f＝30×10$^{-6}$×e（克/厘米$^2$）＝0.3×e（克/米$^2$）＝0.2×e（公斤/亩）。

（7）牧草干物质由8%的无机物质组成，有机物质占92%，

因此$g = f \div 0.92$（公斤/亩）。

（8）牧草的干物质25%贮存于根茎，另有25%变成枯枝落叶损失，可利用的牧草干物质$h = 0.5 \times g$（公斤/亩）。

（9）一般干草的水分含量为15%，将干物质换算成干草产量$Y_i = h \div 0.85$（公斤/亩）。

将上述步骤简化后，便可得到计算牧草光合产量（Y，公斤/亩）的经验公式：

$$Y = 0.01089 \times a \qquad (9.12)$$

计算结果见表9.8。

**表9.8 不同类型天然草场的光合产量与气候生产力***

| 草场类型 | 代表地点 | 青草期光合有效辐射（$10^5$焦耳/厘米$^2$） | 光合产量（Y）（千克/亩） | 温度产量（$Y_T$）（千克/亩） | 降水产量（$Y_R$）（千克/亩） |
|---|---|---|---|---|---|
| 草甸草场 | 海拉尔 | 1.369 | 1491 | 258 | 305 |
| | 昭苏 | 1.612 | 1756 | 483 | 504 |
| | 玛多 | 0.507 | 552 | 127 | 162 |
| | 那曲 | 1.407 | 1140 | 201 | 266 |
| | 理塘 | 1.214 | 1322 | 366 | 544 |
| 草原草场 | 白城 | 1.516 | 1651 | 518 | 378 |
| | 固原 | 1.641 | 1787 | 645 | 485 |
| | 肃南 | 1.428 | 1555 | 434 | 240 |
| | 茶卡 | 1.583 | 1723 | 422 | 212 |
| | 申扎 | 1.197 | 1304 | 269 | 229 |
| 半荒漠和荒漠草场 | 海流图 | 1.842 | 2006 | 626 | 260 |
| | 安西 | 2.257 | 2458 | 1063 | 73 |
| | 莎车 | 2.428 | 2644 | 1341 | 73 |
| | 格尔木 | 2.043 | 2225 | 687 | 59 |
| | 酒泉河 | 1.419 | 1546 | 330 | 86 |

* 表中数字划线者，为比较得出的气候生产潜力。

（引自《中国牧区畜牧气候》）

2. 求算水、热潜力

利用内岛水热产量估算方法，对光合产量进行修正，以光合

产量（Y）作为最高产量，则有

$$Y_T = Y/[1 + \exp(1.315 - 0.119T)] \quad (9.13)$$

$$Y_R = Y/[1 - \exp(-0.000664R)] \quad (9.14)$$

式中，$Y_T$、$Y_R$分别为年平均气温T（℃）、年降水量R（毫米）时天然草场初级生产量（公斤/亩·年）。计算结果见表9.8。

3. 气候生产力的确定

将上面所得$Y_T$与$Y_R$进行比较，选取其值低者作为该地天然草场气候生产力。详见表中数字下划横线者。

4. 分析

根据计算结果进行分析（图9.8），可以认为：

（1）呼伦贝尔、巩乃斯、青南高原东南部、藏北高原东北部以及川西高原中部等草甸草场，气候生产力多为200—500公斤/亩，产草量不高主要是受温度条件的限制；

（2）松嫩平原、六盘山区、祁连山中段、柴达木盆地边缘、藏北高原中南部等草场，气候生产力多在200—500公斤/亩之间，产草量不高主要是水分不足；

（3）内蒙古西北部、安敦（安西—敦煌）、哈密、塔里木盆地、准噶尔、柴达木盆地以及藏北高原西部等半荒漠和荒漠草场，气候生产力高者可达300公斤/亩以上，低者则在50公斤/亩以下，降水量严重不足是产草量的限制因子；

（4）草甸草场地区的气候生产力，与目前的实际产草量比较接近，说明潜力已得到一定程度的发挥，要进一步发掘生产潜力，需要多与非气候因子（如翻耕、改土、施肥）配合考虑；

（5）我国的草原草场、半荒漠和荒漠草场地区，除青藏高原外，热量一般较充足，只要水分条件逐步得到改善，就能发挥较大的生产潜力。

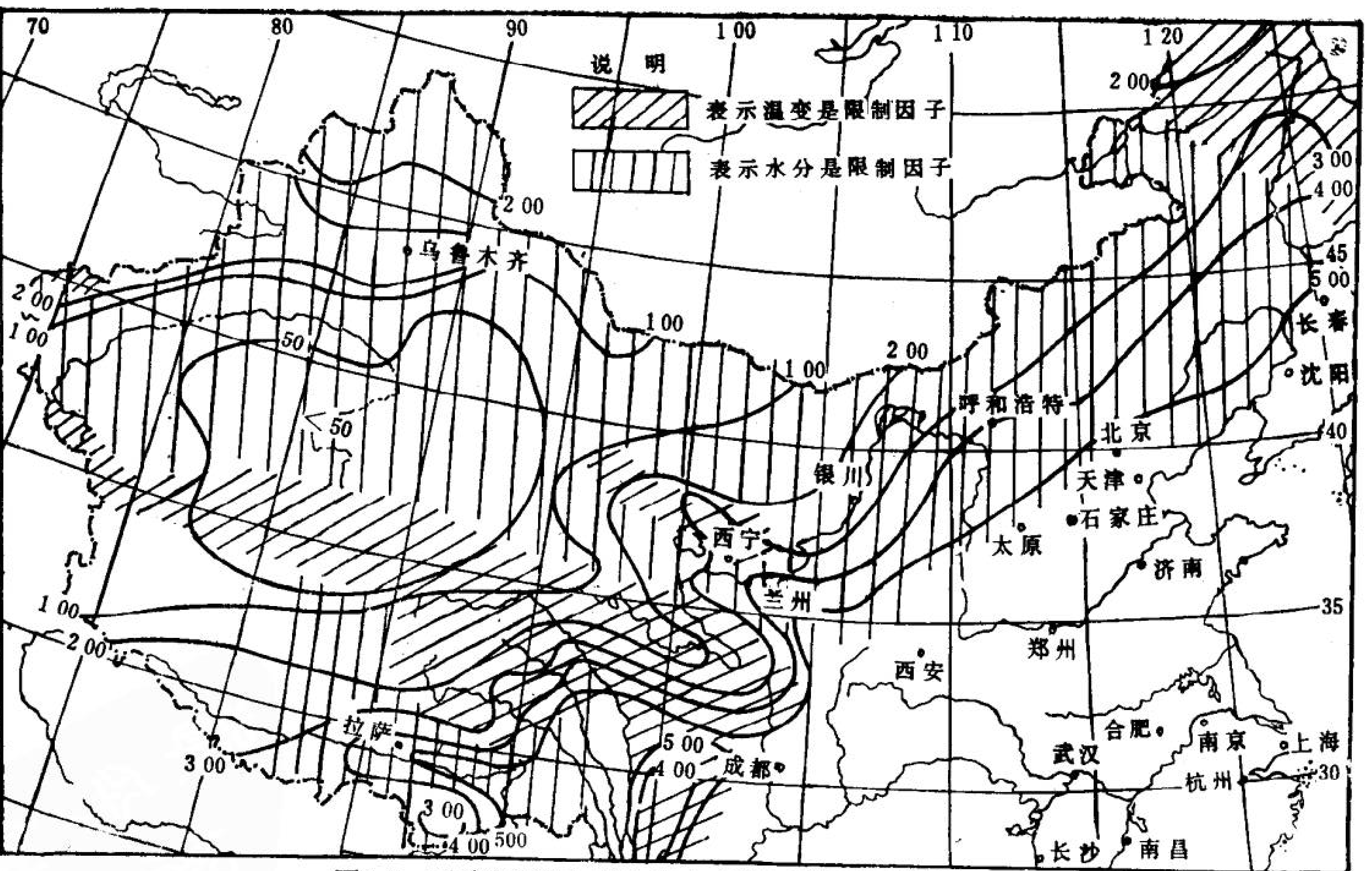


图9.8 天然草场的气候生产力（引自《中国牧区畜牧气候》）

## §2 家畜生产与气象

### 一、气候条件对家畜分布的影响

家畜生长发育要求一定的气象条件，对不良气象条件的忍耐也因畜种而异。同时，我国地域广大，气候多样，自然形成了家畜依赖于气候的分布规律。如内蒙古白绒山羊适宜分布于冬季不宜太冷、夏季干热、全年雨量较少、相对湿度偏低的地区，盐池滩羊则是冬冷夏热荒漠、半荒漠草场的主要畜种之一，该地热量资源丰富、日照时数长、夏季中午炎热、早晚凉爽、冬季较长、日较差较大，降水量少。又如水牛、水禽等多分布于长江以南，而牦牛只能分布在高寒的青藏高原，骆驼主要分布于干旱的荒漠地区，驯鹿则分布在寒冷的冻原与苔原地带。

家畜分布的地理差异必然影响到地区畜种结构的差异。如内蒙古牧区，由东北向西南，再向西及西北，气候逐步由湿润转为干旱，植被类型逐步由草甸至草原、再至荒漠。家畜种类、畜种结构也随之改变，牛、马的比重逐步下降，羊的比重逐步上升至西部荒漠，主要是羊和骆驼（表9.9）。新疆北部山区夏季凉爽、降水丰富，牧草丰美，马、牛、细毛羊的数量占绝对优势，如伊犁的马占全疆马匹总数的1/3，细毛羊和改良羊占全疆该类型羊的1/2；南疆气候干旱、草场条件差，如阿克苏、喀什、和田三个地区马的数量仅占全疆马匹的13%，而驴、骡则占全疆的60%，分布在阿克苏地区塔里木河冲积平原荒漠草场上的羔皮

**表9.9 气候对畜种分布的影响**

| 地区 | 湿润状况 | 年降水量（毫米） | 各类牲畜(%) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 牛 | 马 | 羊 | 骆驼 |
| 内蒙古东北部（额旗） | 半湿润 | 350—500 | 58.1 | 20.9 | 6.4 | 0.2 |
| 内蒙古中部（东乌旗） | 半干旱 | 250—350 | 31.2 | 13.9 | 54.5 | 0.3 |
| 内蒙古西部（阿左旗） | 干旱 | <200 | 7.8 | 4.0 | 50.9 | 34.9 |

羊的数量占全疆总数的86%；西藏地区，从藏东南湿、热河谷到藏北高寒草原，由低到高依次有水牛、驼峰牛、黄牛、犏牛、牦牛等，形成了完整的垂直分布系统。

依据家畜分布规律，结合当地气候条件进行分析，可建立家畜分布的气候模式。如通过对西藏高原主要畜种的生态分布的研究，可得到这样的规律：在一定的热量条件下，西藏牦牛和马的分布数量随水分的增加而增加，而绵羊却相反；又在一定的水分条件下，西藏牦牛随温度的增加而减少。这样就可得到西藏高原家畜分布的气候模式（表9.10）。

## 二、气象条件对家畜生长肥育、生理活动的影响

### （一）气象条件与家畜生长肥育

气象条件对家畜的生长肥育有很大影响，这种影响对不同畜种及不同生育时期不同。各种牛生长肥育的适宜温度范围不同。如1.5岁的黑白花公牛在22℃左右生长最快，21℃以上增重速率下降，到32℃体重开始减轻。初生犊牛的适宜温度为10—15.6℃，此后逐渐下降；用于小牛肉生产的为15.6—21.1℃，肥育期为15.6—－6.8℃。

高温对牛生长的影响很大，对不耐高温的欧洲品种牛影响更大。在高温环境下，绝大多数欧洲牛的生长率均大大下降，当温度持续在24℃时，生长就会受阻，增重越来越少，当达29—32℃时，生长完全停滞。不同品种的牛，对高温的反应也不同。图9.9为两个品种在两种温度条件下体重的动态变化情况。

空气湿度对牛生长的影响亦主要决定于温度。据报道，将4—10日龄的黑白花小公犊饲养于15和7℃两种温度条件，两种温度又有两种湿度条件（相对湿度75和95%）。在15℃中，两种湿度下的增重和饲料利用率没有明显不同；但在7℃时，相对湿度自75%升到95%，增重与饲料利用率都显著下降（表9.11）。空气湿度高，易使地面潮湿，犊牛躺卧时增加传导失热，站立时又因被毛潮湿，增加蒸发失热，都要浪费能量，这可能是犊牛增重

表9.10 西藏家畜分布规律的数学模型

| 因变量$\hat{Y}$ | 自变量X | 线型 | 数学表达式 | R或r |
|---|---|---|---|---|
| 牦牛 | 年平均气温 | 曲线 | $\hat{y}=42.7156-3.1614x-0.0227x^2$ | $R=0.9376^{**}$ |
| | 年降水量 | 直线 | $\hat{y}=-4.1981+0.0662x$ | $r=0.7964^{**}$ |
| 绵羊 | 年平均气温 | 曲线 | $\hat{y}=58.4440-2.0303x-0.1617x^2$ | $R=0.9640^{**}$ |
| | 年降水量 | 曲线 | $\hat{y}=46.3350+0.0812x-0.0001x^2$ | $R=0.9107^{**}$ |
| 山羊 | 年平均气温 | 直线 | $\hat{y}=26.0708+1.0677x$ | $r=0.5584^{**}$ |
| | 年降水量 | 曲线 | $\hat{y}=265.8244x^{-0.4184}$ | $R=0.8319^{**}$ |
| 马 | 年平均气温 | 直线 | $\hat{y}=1.1271+0.2014x$ | $r=0.8246^{**}$ |
| | 年降水量 | 直线 | $\hat{y}=-0.3589+0.0040x$ | $r=0.9573^{**}$ |

（黄文秀等，1980）

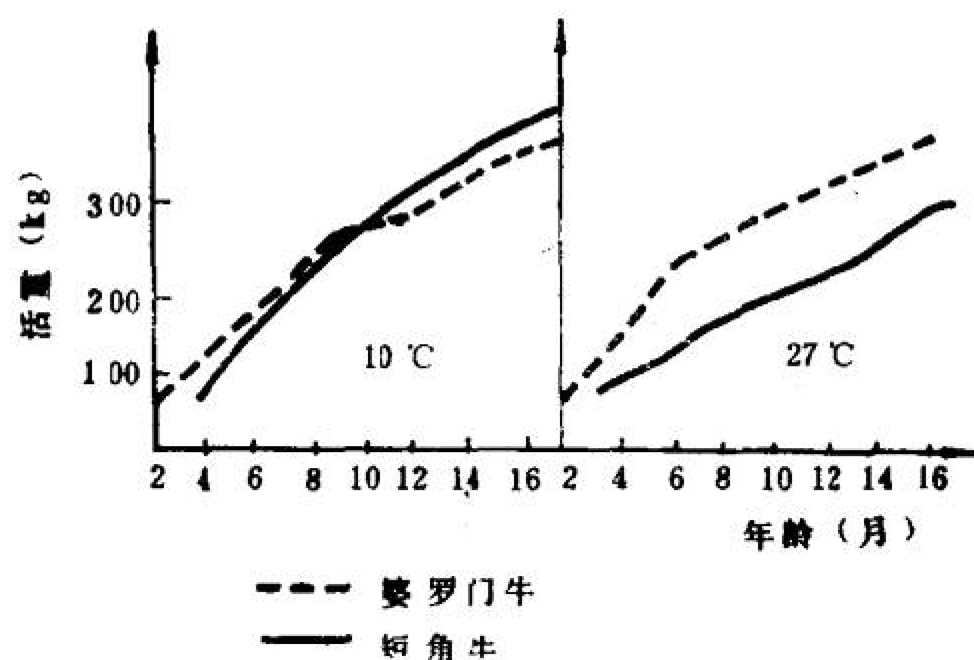


图9.9 温度对不同品种牛生长的影响

**表9.11 不同温湿度条件对幼犊生产力的影响**

| 气温(℃) | 15 | | 7 | |
|---|---|---|---|---|
| 相对湿度(%) | 75 | 95 | 75 | 95 |
| 开始体重(kg) | 45.8 | 45.3 | 41.7 | 41.6 |
| 平均日增重(g) | 330 | 347 | 403 | 345 |
| 采食量(kg,4周合计) | 27.3 | 27.1 | 27.4 | 26.8 |
| 增重/饲料 | 0.36 | 0.39 | 0.54 | 0.48 |

(T.G.Kelly等，1982)

率和饲料利用率下降的原因。

影响猪从断奶到屠宰期间的气象因素主要是温度和湿度。据在相对湿度为50%的条件下研究表明，20℃为猪生长的最适温度。生长育成阶段猪的生长率与环境温度的关系如图9.10所示，当其它条件恒定时，70—100公斤体重的猪，自由采食条件下的

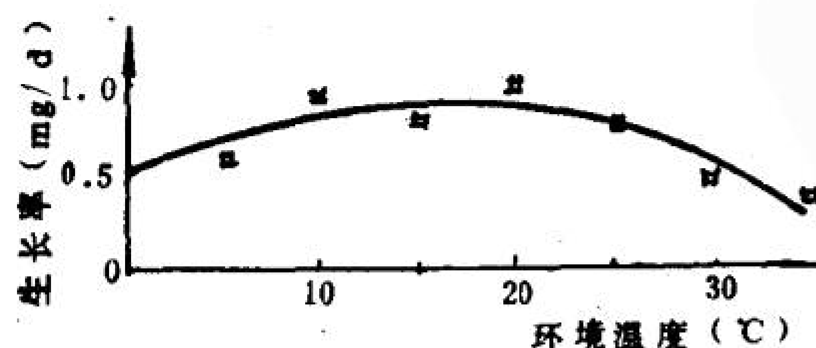


图9.10 环境温度对猪生长的影响

增重情况以20℃为最佳。据在法国的研究，在自由采食条件下，生长一育成猪最佳临界温度为18—20℃，低于或高于这个范围，饲料报酬降低，生长率下降。温度每下降1℃，猪生长率下降24克；温度每升高1℃，则下降12克。

对温度的敏感程度，一般体重重的猪比体重轻的猪更敏感。研究发现，在20—35℃范围内，60—90公斤体重的猪，生长率下降3.3%，而体重为25—60公斤的猪，其生长率仅下降1.7%。不同体重的猪最适温度不同。同时饲养管理条件对猪生长肥育的适宜温度也有明显影响，如群饲、丰厚干燥的垫草和保温的地面都会降低猪的临界温度。

高温情况下湿度对猪增重产生影响（图9.11）。低温而高湿的情况下也因畜体失热增多而使寒冷的危害加重。最适温度条件下，相对湿度的影响一般很小。

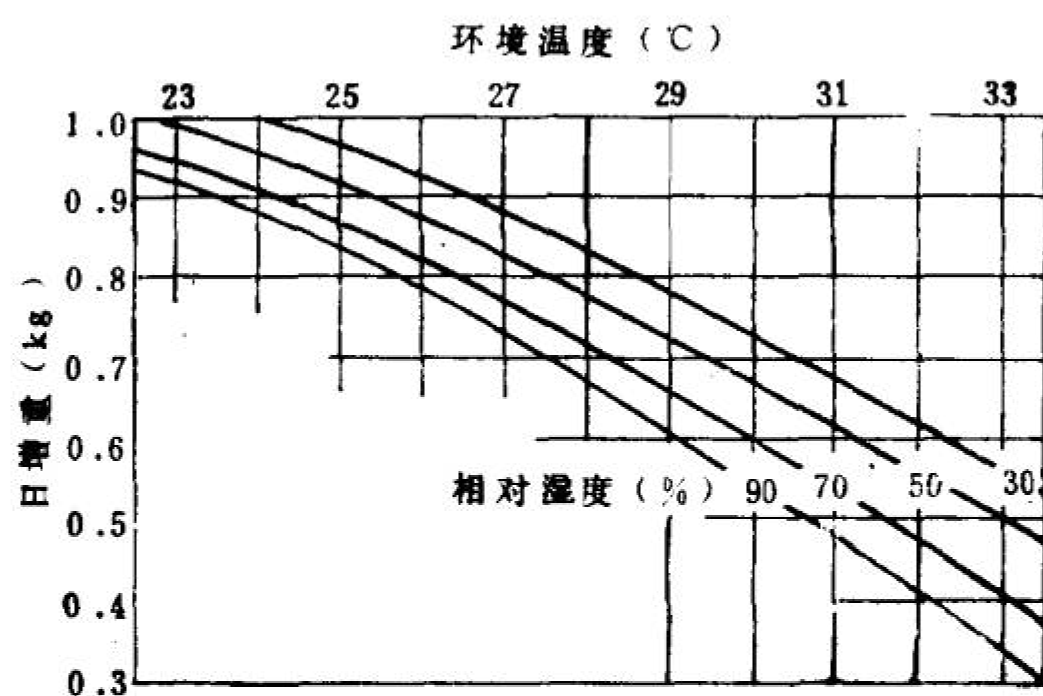



图9.11　高温情况下湿度对68公斤猪增重的影响

被毛完好的绵羊极其耐寒，剪毛后则非常怕冷。据阿梅斯(Ames)等的研究，体重25公斤的羔羊，每两周剪毛一次，饲养于－5，0，5，10，15，20，30和35℃的环境中，气温显著影响其增重率、饲料利用率和蛋白质效率比（PER，指增重克数与蛋白质食入克数之比）。在这种情况下，羔羊生长最快的温度为15℃，饲

料利用率以10—20℃为最高，PER则以10—15℃为最大，温度上升或下降，各种生产指标均下降。平均日增重（ADG，克）日平均与气温（T，℃）之间具有下述关系：

$$ADG = 129.94 + 9.72T - 0.35T^2 \quad (9.15)$$

光照长度对绵羊的生长也有影响。但不同的研究者所得结果有所差异。如莫斯（Moose）等报道肥育羔羊在持续光照中的生长率和饲料利用率都低于自然光照或自然光照加间隙的人工光照。

鸡育雏的适宜温度随日龄的增加而下降。日龄育雏器的温度，蛋用型为38℃左右，此后逐渐下降到第四周龄的21—22℃，如系整舍育雏，开始室温为31—33℃，逐渐下降到21—22℃。肉用型可低3℃左右。经常保持在20℃左右时，鸡的生长速度最快，而饲料转化率则在34℃时最高。气温高于适宜范围，对鸡的生长和存活都不利。随着温度升高，雏鸡的进食量和增重均显著下降（表9.12）。将白色来航鸡自2到32周龄饲养于21.1，29.4和35℃三种温度中，在高温中增重率下降20—30%，最后一周的采食量只有适温的50%。

**表9.12 温度对6—15日龄雏鸡的影响**

| 温度(℃) | 21 | 27 | 32 | 38 | 40 |
|---|---|---|---|---|---|
| 进食量(g/d) | 15.0 | 13.3 | 11.7 | 8.7 | 7.9 |
| 增重(g/d) | 4.88 | 4.64 | 4.39 | 2.97 | 2.91 |

相对湿度60—70%为肉用仔鸡生长的理想湿度。过低过高都不利。

火鸡育雏和生长要求的温度较高，育雏开始为38—41℃，生长期最适温度为24℃，育肥期为18℃，15—21℃为火鸡增重的最佳温度范围。鸭的育雏温度从32℃开始，每周递减3℃，到16—18℃左右，高温对鸭的生长很不利。

（二）气象条件与家畜产热、散热及体热平衡

家畜多为恒温动物，其体温之所以能维持恒定，是由于具有完善的热调节能力，使产热与散热达到平衡。

气温是影响家畜产热的最主要气象因子，图9.12为环境温度对动物体产热和体温影响的一般模式图。但家畜品种、性别、年龄、体重及饲养方式等不同，温度对产热量的影响也有不同。

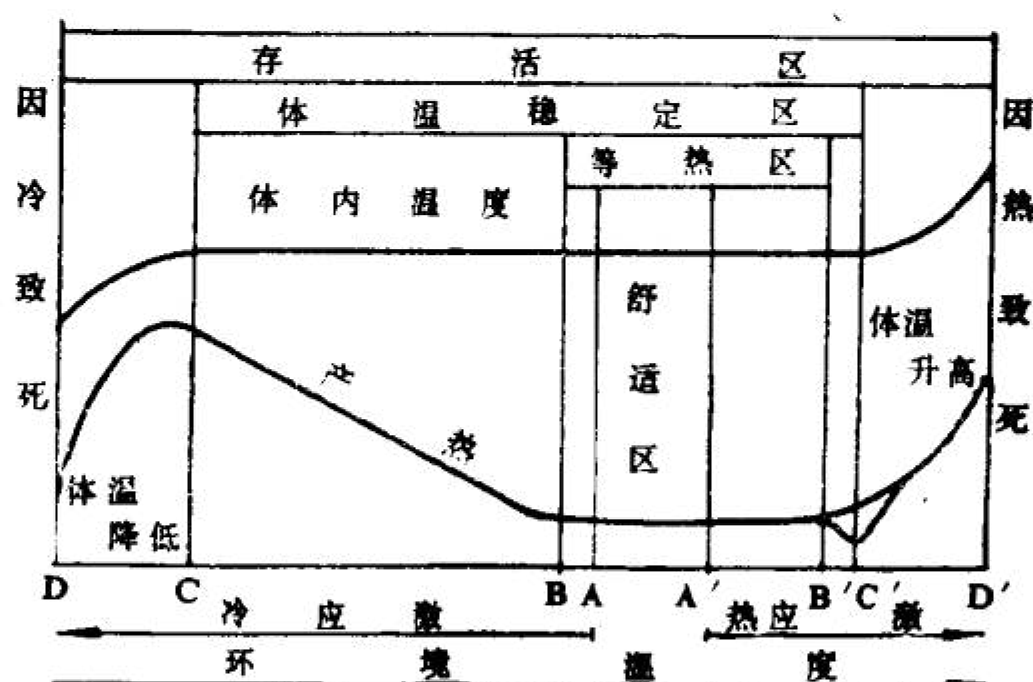



图9.12 环境温度对动物体产热和体温的影响（模式图）

气流是影响家畜产热的另一重要因子。在不太炎热的气象条件下，风速增大对产热量的影响等于气温下降。在低温、大风的综合作用下，可使家畜的代谢率显著提高。如在－7.8—6.7℃的低温中，风速自0.2米/秒增大到4.5米/秒，黑白花牛、娟姗牛和瑞士褐牛的产热量增加20—35%。环境温度越低，风的影响则越大。如在5℃中，风速0.3米/秒增大到4.3米/秒，被毛厚5厘米的绵羊，产热量增加不到40%，而在－3℃中，则增加70%以上。

家畜体内产生的热是通过辐射、传导、对流和蒸发四种方式经皮肤和呼吸道发散的，在一般条件下，动物的非蒸发散热约占总散热量的75%，蒸发散热占25%，鸡的蒸发散热较少，约占12—25%，平均17%。

动物体辐射失热的多少，除决定于体表的结构和颜色外，还受周围物体的温度和空气状况等的影响。周围物体温度低时，家

畜辐射散热增多；周围物体的温度高于动物皮肤温度时，动物得到的外来辐射热量反多于自身的辐射散热。由于纯洁空气不能直接受动物体辐射散发出的热量，而空气中的灰尘和水汽都能大量接受，因而当空气温度低且潮湿、污浊时，动物辐射热量增多，空气温度高且干燥、洁净时，动物辐射热量减少。风速增大，对流散热增加，使辐射散热在非蒸发散热中的比率下降。太阳的直接辐射和散射辐射，可使家畜（尤其是舍外家畜）受到大量的辐射热，从而使家畜的辐射散热减少。

传导散热量的多少，主要取决于动物所接触物体的温度及该物体的传热能力。物体温度越低，动物失热越多；物体温度等于动物皮肤温度时，热量的流动达到动态平衡；物体温度高于动物皮肤温度时，反使动物体得热。物体传热能力强时，动物失热或得热增多，传热能力弱时，失热或得热减少。

对流散热大小主要决定于气温和风速，气温低、风速大时，失热量多，气温高、风速小时，失热量减少。

辐射散热的途径主要是皮肤蒸发与呼吸道蒸发。气温、空气湿度和气流是影响蒸发散热的三个主要因素。这种影响因动物种类、品种、个体、年龄、营养水平和被毛状态等的不同而有差异。随温度升高，蒸发散热呈上升趋势，达等热区后迅速上升。除鸡因无汗腺，高温时主要依赖呼吸道蒸发散热（图9.13）外，

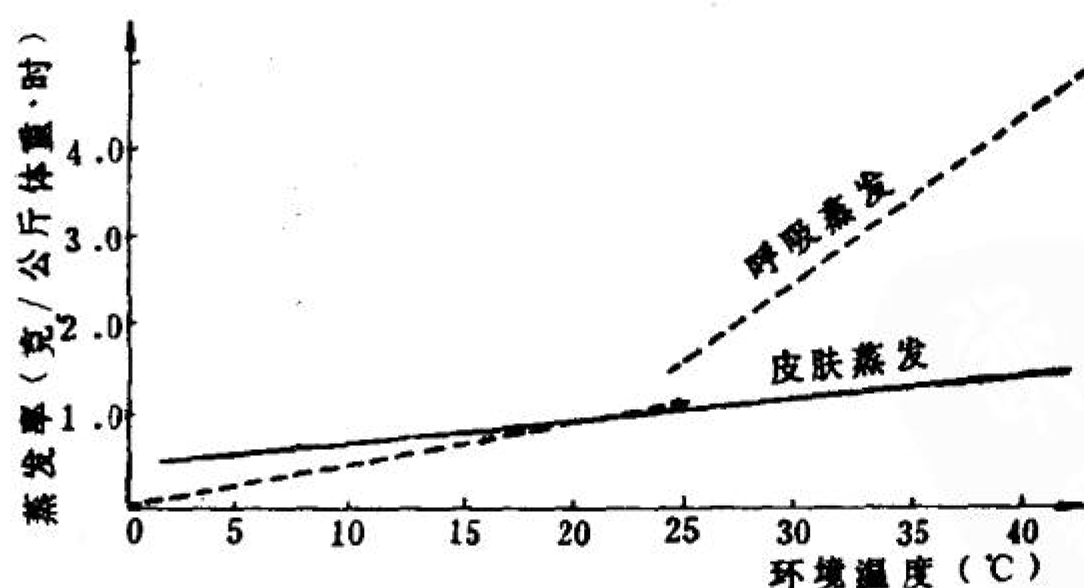



图9.13 环境温度对鸡蒸发散热的影响（S.A.Richards，1976）

其它家畜在高温下皮肤蒸发散热升高较快，所占比例也迅速增加（图9.14）。在适宜的温度条件下，湿度影响不大，在高温或偏高的温度中，则随空气湿度的增加，蒸发散热显著下降（表9.13）。

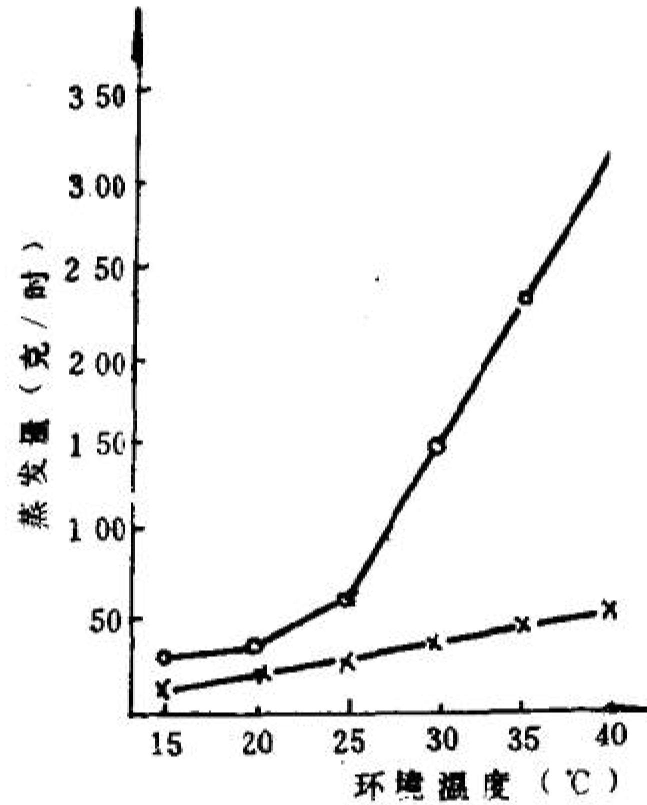



图9.14 爱尔夏小公牛皮肤（o）和呼吸道（×）蒸发与环境温度的关系（Mclean，1963）

**表9.13 不同环境温度下相对湿度对鸡蒸发散热的影响**

| 气候背景 | 温度(℃) | 相对湿度(%) | 蒸发散热在总辐散热中所占的% |
|---|---|---|---|
| 正常，干燥 | 20 | 40 | 25 |
| 正常，潮湿 | 20 | 87 | 25 |
| 温暖，干燥 | 24 | 40 | 50 |
| 温暖，潮湿 | 24 | 84 | 22 |
| 炎热，干燥 | 34 | 40 | 80 |
| 炎热，潮湿 | 34 | 90 | 39 |

（A.R.El-Boushy，1983）

风速的影响也与温度有关。在适温和低温时，增大风速，因可加强对流散热，降低皮肤温度和水汽压，使蒸发散热量显著减少。但若产热量亦增加，则蒸发失热也随之增加。高温时一般随风速增大，蒸发散热增加。

（三）气象条件与家畜采食、消化及饮水

家畜采食、消化、饮水是其生长发育、形成产品的物质保证，同时也是维持能量代谢与体热平衡的基础。在寒冷环境中为提高代谢率、增加产热量，在炎热环境中为降低代谢率、减少产热量，均表现在采食量等的调整上。家畜的采食量、消化率和对水分的消耗，受气象条件的影响，其中最主要的是温度条件。

在等热区范围内，家畜采食量比较稳定。当气温降低时，为了适应提高产热量的要求，家畜的食欲增强、采食量增加；气温升高时，为了减少产热，家畜食欲减退。图9.15为温度对牛、猪、鸡采食量影响的情况。Brink (1975) 研究表明，剪毛羔羊在一

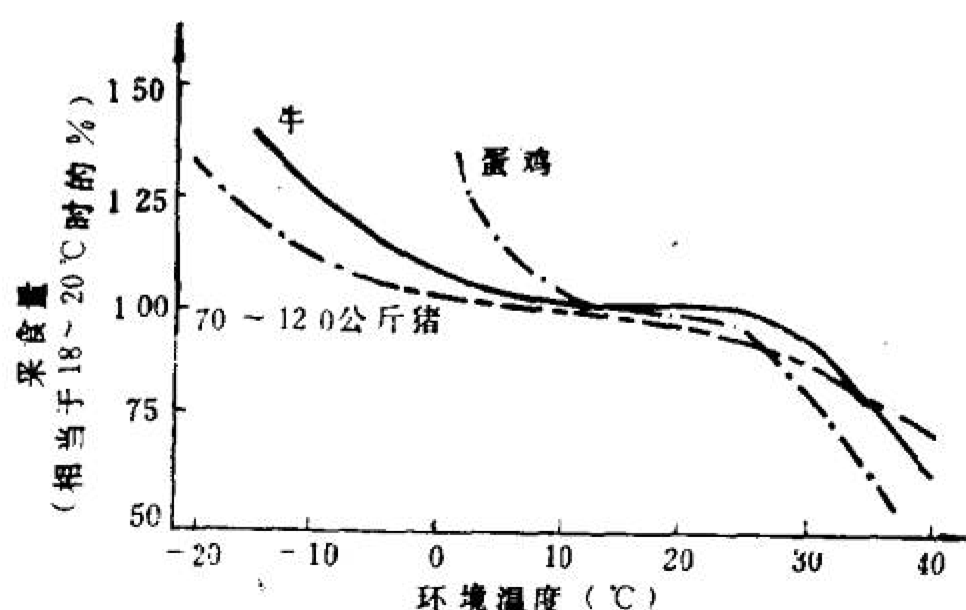



图9.15　温度对牛、猪、鸡的采食量的影响

个相当大的范围内（－5—35℃），每日干物质的采食量(DMI，克/公斤体重$^{0.75}$）与环境平均温度（T，℃）呈线性关系：

$$DMI = 111.3 - 0.52T \qquad (9.16)$$

Steinbach (1976) 得出猪的采食量随环境温度关系为：

$$F = 145.7 + 1.96T - 0.104T^2 \qquad (9.17)$$

式中，F为每天的采食量（克/公斤体重$^{0.72}$），T为环境温度（℃）。另外，在高温环境中如果湿度升高，则影响更大。

温度对消化率的影响与对采食量的影响恰相反，即低温时消化率下降，高温时消化率提高。如与20℃时相比，体重为45千克的生长猪、在6℃中日粮干物质、粗蛋白质和能量的消化率都

明显下降，分别为80.8、79.4、79.9、和78.2、74.7、77.0%，环境温度每下降1℃，消化率的下降幅度为0.12—0.48%。但在高温高湿的严重热应激下，亦可使消化率下降。

影响家畜需水量的因子包括动物种类、生理状态、干物质采食量、饲料的物理性状和化学组成、水的可利用性和供水制度、水质、水温和气温及其它气象条件。气温对饮水量的影响，一般是随气温的升高，饮水量增加，水温低，饮水量减少。如对牛（表9.14）、绵羊，都是如此。但对猪则有不同，体重34.1—56.8千克的小猪，气温自10℃升高到38℃，每小时每只猪的水消耗量自0.091千克增加到0.27千克，其中大部分是在32.2℃以上增加的；体重125—172.7千克的猪，在26.7℃以下，随气温的升高，水消耗量增加，但在26.7℃以上，水消耗量下降，38℃以上又再升高；妊娠母猪没有一定规律，但在26.7℃以上，水消耗量又下降。

表9.14 不同温度下牛每公斤饲料干物质的需水量

| 气温(℃) | 4.4 | 10 | 15.6 | 21.1 | 26.7 | 32.2 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 需水量(kg) | 3.08 | 3.33 | 3.83 | 4.50 | 5.16 | 7.33 |

(C.F.Winchester等,1956)

人工气候室及室外观察都表明，湿度升高，家畜对水的消耗减少，在温度较高的条件下，太阳辐射也可使家畜饮水量增加。

（四）气象条件与家畜生殖

1. 光照与家畜生殖

光照的影响，包括光照长度及强度的影响。前者主要是影响家畜的性活动，后者则以影响受胎率为主。而且其影响对于公畜和母畜有所不同，有时差异比较大。

在自然条件下，一般公羊的精液质量以秋季日照缩短时升高，如果人为地增加秋季的光照长度，减少春季的光照长度，能使其

性活动季节发生改变。公马与绵羊相反，在春夏长日照时期精液质量最高，性行为的反应明显，到秋冬季节则均趋下降。牛虽不是季节性配种的动物，但在春季公牛的繁殖力和精液质量都较高，冬季的繁殖力最低，这除了温度的影响外，光照也是一个重要影响因子。家禽对光照的反应很敏感，小公鸡开始生产精液的日龄与光照长度呈负相关，在光照长度的递增期间对精子的生成有促进作用，光照长度递减则抑制之。

同样，光照对母畜的影响也各有不同。如原产高纬度的母绵羊的性活动显著受白昼长度变化的影响，而在低纬度地区和高度驯化的绵羊则终年可以配种或者每年可产羔二次。小母鸡的性成熟日龄与培育期的光照长度为负相关。每天10小时或以上的光照，足以导致最快的性成熟；10小时以下的光照，性成熟的日龄随光照长度的缩短而延长。在恒定的光强下可用下式预估性成熟日龄：

$$Y = 170.2 - 1.610P + 0.00061P^2 + 0.001918P^3 \qquad (9.18)$$

式中，P为每天光照时数，Y为产第一个蛋的平均日龄。根据该式，可以计算每天不同光照时数所需产第一个蛋的平均日龄。

太阳辐射强，尤其是在高温季节，将加重热应激的影响。在美国佛罗里达州的亚热带环境中，乳牛在输精后1日的最高气温和输精之日的太阳辐射强度两者与受胎率呈曲线关系。如受胎率（Y，%）与太阳辐射强度（I，兰）之间的关系可表示为

$$Y = 0.3399 + 0.00035I - 0.0000005I^2 \qquad (9.19)$$

2. 气温与家畜生殖

气温通过直接作用于生殖器官（如作用于睾丸，伤害精子的生成，作用于子宫，引起胚胎的死亡），而影响家畜的繁殖性能，并以高温的影响最为显著。

高温影响公畜精子的生成、精液质量和受精力。大多数哺乳动物都能局部调节阴囊的温度，使之比体温低3—5℃，以适于精子的生成。如果睾丸温度较正常提高3℃，精子就要死亡或不能

生长。高温使家畜精液质量下降，如公羊对高温反应敏感，气温达26.7℃，即达精液质量下降的临界温度。在纬度 35° 地区，公羊常有夏季不育症。饲养于气温27℃、相对湿度73%的热室内的公羊，与饲养于20.6℃中比较，除射精量稍多外，其它指标都显著下降（表9.15）。此外，高温还常常抑制性欲。

**表9.15　环境温度对公羊精液质量的影响**

| 环境温度（℃） | 射精量（毫升） | 精子活力 | 活精子% | 正常精子% | 精子浓度 |
|---|---|---|---|---|---|
| 27.0 | 0.92 | 3.5 | 67 | 73 | 3.48 |
| 20.6 | 1.20 | 1.8 | 35 | 43 | 1.43 |

（J.R.Brooks，1962）

在配种前后及整个妊娠期间各阶段，环境高温对母畜的繁殖性能均有不利影响。（1）高温使母畜的发情受到抑制。试验证明，经过冷适应的肉用母牛在32℃环境下即停止发情，而在38℃的高温下，即使已经热适应的肉用母牛也停止发情，环境温度升高使母牛的发情持续时间亦明显缩短。延长高温影响的时间，排卵时间延迟。环境高温导致体温升高，使受精卵显著减少，而异常卵子显著增多。（2）高温严重影响胚胎存活率。在繁殖过程中的不同时间使母绵羊处于32℃的温度下以观察受精卵的存活率，结果各组的胚胎死亡率（死亡受精卵的%）均显著高于对照组。小母猪在配种后0—8天受高温影响，胚胎存活数亦显著减少，妊娠率下降。据对母牛的研究，配种时或配种前后是关系受胎率的重要时期，输精后1天的最高气温(X)与受胎率(Y)具有下述关系：

$$Y = 0.2434 + 0.0149X - 0.0003658X^2 \qquad (9.20)$$

（3）妊娠后期环境高温亦对繁殖有显著不良影响，小母猪在妊娠时期（配种后102—110天）受高温影响后，产活仔较少（6.0—10.4头）、死胎较多（5.2—0.4头）、窝重较小（6.8—13.6公斤）。妊娠中，后期母羊受高温影响后，胎儿较小，初生率下降，死亡率增高。（4）高温还延迟小母鸡的性成熟期，严

重影响禽蛋的孵化率，鸡蛋在产出期间如受高温影响将使以后的繁殖率和孵化率显著下降（表9.16）。

**表9.16 鸡蛋产出当天受高温影响对孵化率和繁殖率的影响**

| 气温（℃） | | 繁殖率（%） | 孵化率（%） |
|---|---|---|---|
| 最高 | 平均 | | |
| 28 | 18 | 93 | 79 |
| 30 | 19 | 92 | 79 |
| 34 | 25 | 92 | 79 |
| 36 | 27 | 87 | 72 |
| 39 | 31 | 80 | 68 |
| 42 | 34 | 74 | 55 |

3． 空气湿度与家畜生殖

高湿有加剧高温的不利作用，因而其影响大小，多以温湿指数（THI）来分析。英格拉汗（Ingraham）等提供了在充分饲养、良好管理下的高产荷斯坦牛受胎率的资料，用配种前两天、当天及后一天平均THI来估计墨西哥西海岸靠近库利亚坎地方的亚热带条件下的受胎率。在1963年4月至1965年12月间，平均日THI为62—86。191头母牛配种时THI在66以下的受胎率为67%；818头牛，配种之日THI为76时，受胎率为21%，该日平均THI自70增加到84，受胎率自55%下降到10%（r＝－0.995）。配种前2天的THI与受胎率关系最显著。当THI在68和82之间时，如果配种前2天平均THI低于配种之日，平均受胎率为42.3%，若高于配种之日，则下降为31.9%。配种之日的THI的差异越大，影响就越大。

另外，THI对受胎率的影响还因季节而有不同。在夏初THI上升时期，因家畜对高温高湿尚未适应，受胎率显著下降；在秋季THI下降期，对受胎率的影响则较小。

## 三、气象条件对家畜生产力的影响

（一）气象条件与家畜产肉

一般说，生活于寒冷地区的家畜较温暖地区的家畜体形大、产肉量多、屠宰率高。如天山中部高山盆地的尤尔都斯，1月份平均气温－27℃，该地牦牛体重达400公斤；青海玉树地区，1月份平均气温－7.9℃，牦牛体重300公斤左右；而西藏昌都地区，1月平均气温－2.5℃，牦牛体重仅200公斤上下。温度还是影响牛肉质量的主要因素，伴有高湿的高温环境所产生的热应激，严重地影响牛的食欲和生长，从而影响牛肉的嫩度、味道、汁液含量及脂肪颜色等。如赤道地区的牛，特别是由于缺乏照料和管理而处于热应激条件下的牛，肉质很差，一般粗糙而坚韧，不适合作食用。

环境温度制约着肉猪的生长。据在湖南娄底所做的试验，肉猪生长增重与环境温度呈二次曲线关系。维尔斯特根（M.W.Verstegen）等（1978）总结指出，在5—25℃范围内，温度每升高1℃；猪的采食量减少0.81%；在20—25℃内，温度每升高1℃，增重减少0.77%；在20℃以下，温度每下降1℃，增重减少14克/天。低温情况下，每公斤增重所需要的饲料较多，高温下较少。饲养于25℃下，猪的瘦肉率比较高；低温下较低（图9.16）。

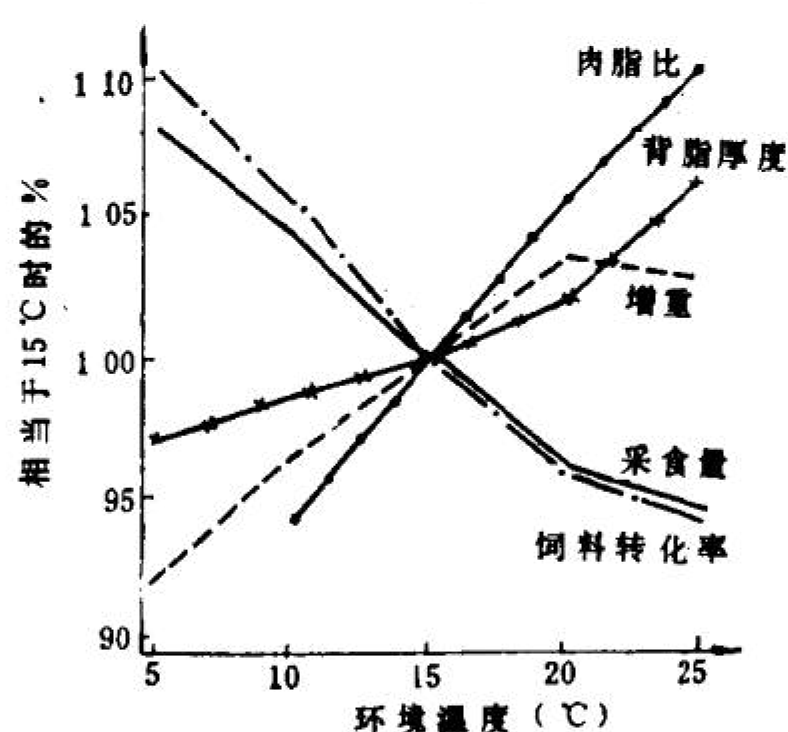



图9.16　环境温度对猪的影响

温度高低及变幅影响肉鸡生长，温和高特夫雷（Winn & Godfrey）(1967)测出，养于37.8℃恒温中的肉用仔鸡的增重显著低于养在26.7、15.6和8.3℃的肉用仔鸡。德彤(Dea ton)等(1972)发现，肉用仔鸡从4周龄到出售期，最高生长速度是在18℃，最高饲料利用率是在24℃，两者综合考虑，在21℃时产肉量最多。里斯（Reece）等（1972）的试验表明，一定的温度变幅对鸡的生长更有利且能抗高温。他们在培育肉用仔鸡时作三种处理：日温变幅为21.1—32.2℃、日温变幅为23.9—35℃及21.1℃恒温，至第8周龄期使所有的鸡每隔2小时在40.6℃下处理2小时，结果第1、2组的鸡死亡率在10%以下，第3组鸡的死亡率为29%。

（二）气象条件与家畜产奶

尽管家畜品种类型、个体状况、泌乳阶段及饲养管理水平不同，使产奶量存在差异，但气象条件的适宜与否，也是一个重要的影响因子，有时且是一个主要因子，其中又以温湿条件的影响最大。

乳牛产奶量在温度适宜范围内，产量较高，超过这一范围，则随环境温度升高或降低而下降。图9.17为温带条件下的荷斯坦

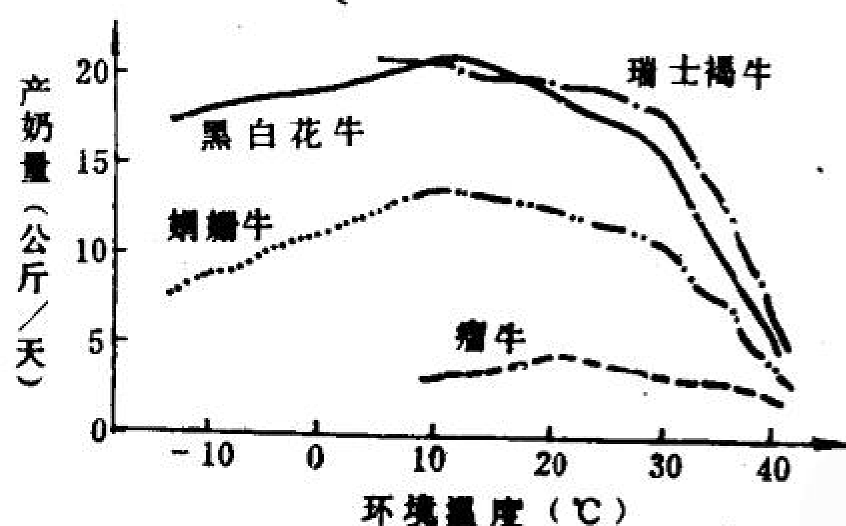



图9.17 温度对牛产奶量的影响

牛（黑白花牛）、娟姗牛、瑞士褐牛和热带条件下的婆罗门牛（瘤牛）在相对湿度为40—60%时随温度的变化情况。显然，温度的影响对不同的品种有差异。婆罗门牛在35℃高温下产奶量很

少下降，而此时荷兰牛的产奶量已下降50%以上。荷兰牛体型较大，因而能耐低温，在寒冷条件下产乳量下降很少，但在炎热条件下下降却快得多。另外，高产牛一般比低产牛对温度的反应更为敏感。

温度影响产奶量，主要是由于进食量减少，饲料利用率下降，导致生产力下降。如较高的温度使乳牛散热困难，体温升高，热平衡破坏，采食量减少，使能量和蛋白质等养分摄入不足，产量下降。

温度还影响乳的成分。气温升高，乳脂率下降。当温度升高到32.2℃以上时，乳中脂肪虽有所增加，但非脂固体、含氮率则降低；低温时，脂肪、非脂固体和含氮率均有增加（表9.17）。

**表9.17　环境温度与牛乳品质的关系**

| 温度（℃） | 乳脂率（%） | 非脂固体（%） | 酪蛋白（%） |
|---|---|---|---|
| 4 | 4.2 | 8.26 | 2.26 |
| 11 | 4.2 | 8.26 | 2.23 |
| 15 | 4.2 | 8.06 | 2.08 |
| 21 | 4.1 | 8.12 | 2.05 |
| 27 | 4.0 | 7.88 | 2.07 |
| 29 | 3.9 | 7.68 | 1.93 |
| 32 | 4.0 | 7.64 | 1.91 |
| 35 | 4.3 | 7.58 | 1.81 |

湿度对产奶量的影响，往往与温度的影响相配合。当温度超过27℃时，就应考虑湿度的影响。图9.18说明了不同的温湿条件对日产奶量约23、18和14公斤时的影响。显然，随温湿指数升高，影响增大，特别是对高产乳牛。

风对产奶量的影响一般较小，尤其在适温条件下，在偏高的温度下，由于风可使舒适区的温度有所升高，故适当的风速是有利的。太阳辐射过强，尤其在高温中，由于加剧了热应激，迅速破坏热平衡，会使产奶量下降。

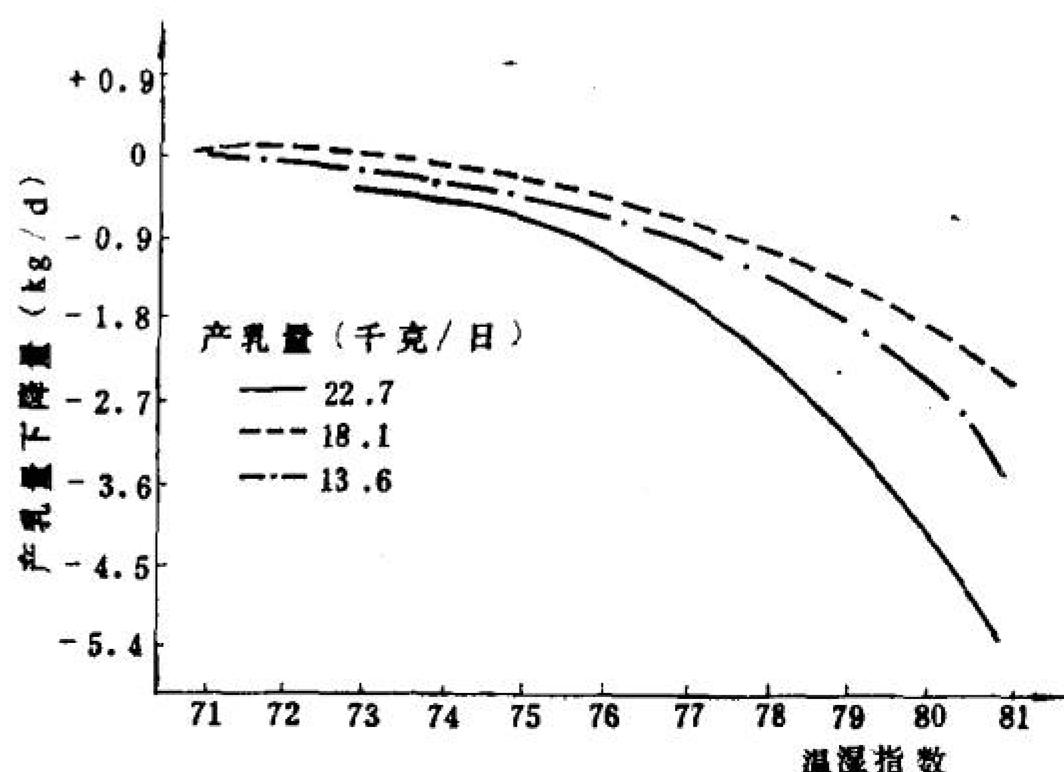



图9.18 不同温湿指数对乳牛产乳量的影响（以18℃的产乳量为基础）（H.D.Johnson等，1982）

（三）气象条件与家禽产蛋

在自然气候条件下，温带家禽产蛋量有明显的季节性变化。这主要是由于日照长度以及气温和营养的作用所引起。成年母鸡产蛋量季节性变化规律是：自冬末春初起，产蛋量逐渐增加，至暮春初夏达到高峰，随后逐渐下降，在夏秋高温季节进入换羽期，产蛋量降到最低值，换羽后开始产蛋，进入严寒季节又处于低潮。纬度越高，这种变化越明显。由于热带地区的日照、气温等的季节性变化不甚明显，人工控制的小气候环境中，光、温、风等较为恒定，则产蛋量的季节性变化较小。

光是作为影响家禽性腺功能的一个内在因子，从而对产蛋产生影响。不同光照对小鸡的开产日龄有很大影响。小母鸡在逐渐延长（递增）的光照下培育，较为早熟，但对产蛋年前半期的生产性能有不良影响，如小蛋较多，产蛋量较少；在逐渐缩短（递减）的光照下培育，较为晚熟，在产蛋年上半期能生产较大、较多的蛋。冬季人工补充光照，往往具有使停产鸡恢复产蛋或正在产蛋鸡延长产蛋的作用，使产蛋率提高。

光照强度对产蛋有一定影响。据莫里斯（Morris，1967）的试验，每只母鸡到500日龄的产蛋数（E）与0.12—37勒克斯范围内光照强度的常用对数（X）存在下述关系：

$$E = 232.4 + 15.18X - 4.256X^2 \quad (9.21)$$

综合各方面考虑，生产实践上一般采用10勒克斯的光照。

环境温度对家禽产蛋影响一般温度过高，产蛋率下降，蛋形变小，蛋壳变薄、变脆、表面粗糙；温度过低，特别是气温突然下降或持续低温，也使产蛋率下降，但蛋较大，蛋壳质量正常。如在气温21℃、32℃和38℃条件下，对白色来航鸡进行的8周试验，其产蛋率分别为79%、72%和41%。据统计，自21℃起，气温下降1℃，产蛋率下降0.5%，气温在25—30℃之间，每升高1℃，产蛋率下降1.5%，每只蛋重减轻0.3克，30℃以上产蛋率急剧下降。生产实践中，应尽可能使舍内温度最好能保持在21—25℃，一般情况下不低于10℃或高于30℃，严冬时应设法使舍温不低于5℃，盛夏时不超过32℃

（四）气象条件与家畜产毛

光照对羊毛生长有刺激作用，人工短光照、间隙光照及恒定的长光照都使羊毛生长加快。气温过低、过高对羊毛生长不利，其影响程度与被毛厚度有关。如若冬季毛层较厚，低温不足以影响皮温，则对毛的生长没有作用。

气象条件对毛的质量，一般说产量高则质量差。据樊锦沼等（1988）对内蒙古白绒山羊的研究，绒纤维直径与产绒量呈负相关，较高温度使绒毛变白，纤维直径变细，质量提高，但产绒量下降；较低温度可促进山羊生长，个体增大，产绒量增多，纤维直径变粗。

环境温、湿度条件影响长毛兔毛的产量与质量。据吴时英（1983）的研究，夏季高温条件下，兔毛产量、质量均下降，冬季低温时则相反。适温时，高湿虽对产量影响不大，但却使质量下降。其适宜的温、湿条件分别为11—18℃、72%左右。

## §3 畜牧气象灾害

畜牧气象灾害指不利气象条件对畜牧业造成的危害，包括草原畜牧业中常见的气象灾害及舍饲畜牧业中不利气象条件的危害。不利气象条件除造成畜、禽受害死亡外，还常诱发畜禽疾病的发生，甚至造成死亡。影响我国牧区的主要气象灾害有干旱、暴风雪、雪灾（包括黑灾与白灾）、低温霜冻、大风、风沙和冰雹等。不同牧区，灾害不尽同。如新疆主要有干旱、雪害、暴风雪降温等；西藏主要有雪灾、低温霜冻、风灾、干旱和雹灾等；内蒙主要有干旱、大风、沙暴、冰雹和雪灾等。

### 一、畜禽疾病与气象

气象条件是畜禽生态环境中的重要物理因素。它既直接作用于家畜机体，也通过饲料（草）间接影响家畜。同时，病原微生物和寄生虫与周围生态环境存在着密切关系，因而，家畜疾病的发生、发展和消亡的过程，与气象条件关系密切。了解各种疾病产生及流行的气象条件，对于有效地预防家畜疾病，提高家畜生产力，具有重要意义。

（一）气象条件的直接致病

气象条件的直接致病包括直接有害效应和冷、热应激。直接有害效应如光照引起的家畜疾病中的皮肤病（晒斑、光照性皮炎、皮肤癌）、眼病（光照性眼炎）和脑病（日射病、热射病）等。由于气压的影响，使不适应高海拔环境的家畜产生高山病。气温大幅度升降易产生呼吸道疾病。寒流突然侵袭或耕牛突遭狂风冷雨，多发生肠痉挛。农畜（牛、马）在炎热天气下过度使役，常发生肺充血。天气多变，寒冷的刺激，常大批发生幼畜肺炎，并诱发鼻炎、感冒、急性支气管炎、肾炎及马的肌红蛋白尿等。

非传染性消化道疾病和胶原性疾病等均与气象条件有关。潮湿、寒冷易发生幼畜消化不良；阴雨天气使骨软症和关节炎加

重；雨天使役的马、骡易发生蹄叶炎等。

（二）气象条件的间接致病

在一些地区，气象条件还影响到植物化学成分及微量元素与维生素的含量，使畜禽发生各种营养性疾病。如高温多雨，因土壤淋浇，植物含钙量降低，干旱年份的饲料含磷量十分贫乏，引起家畜缺钙或缺磷病。夏季多雨，使饲草中含镁量降低，使牛、羊发生青草搐搦症。

不同气象条件常诱发不同畜禽的疫病中毒：如温暖多雨季节发生的青饲料亚硝酸盐中毒；秋收期间阴雨使稻草霉烂引起真菌毒素，发生耕牛霉稻草中毒（烂蹄病）；雨水过多年份发生的马霉玉米中毒；高温高湿，特别是江南梅雨季节，饲料霉变，发生黄曲霉菌霉素中毒；因天气引起牧草的真菌，发生羊面部湿疹；干草或青贮料因天气潮湿发霉，发生真菌性流产病；大雨期间常流行严重影响羊毛质量的真菌性皮炎；早春气温偏高，毒草萌发早，往往使放牧家畜误食，发生中毒，等等。

（三）气象条件的季节性变化与家畜疾病的周期性循环

家畜一年四季有不同的常见病与多发病，大多与气象条件有关。它的季节性变化是家畜疾病周期性循环的根本原因。一般来说，炎热多雨的暖季是胃肠道疾病发生的基本条件，多发生胃肠道传染病和日射病、热射病；寒冷季节易患风湿病、呼吸道传染病和冻伤；天气多变的春、秋季节，则多发生肺疫、支气管炎、肺炎、鼻炎等疾病。图9.19为一些常见疾病流行的季节性特性。

**二、干旱及其危害**

（一）干旱的危害及指标形式

干旱对牧业生产的危害是多方面的。春旱影响天然草场牧草的正常返青和人工牧草的播种、出苗，导致青草期缩短。夏季是牧草产量形成的关键时期，发生干旱则导致产量降低、品质变劣，适口性差。当发生连续干旱时，将加剧草场退化和草原土壤沙化的进程，对人工草场建设、天然草场的改良也带来不利影

图9.19 疾病流行的季节特性

（引自《中国牧区畜牧气候》）

响。冬春少雪、夏季干旱，将使地下水位下降，湖泊、泡子水面缩小，泉水枯竭，河水断流，造成家畜饮水因难而成灾。

由于不同类型的草原，牧草丰产要求的降水不同，不同季节同一牧草的不同生长发育时期要求的降水不同等，仅用降水量来作为干旱指标就有很大不足，可用草场干湿指数（H）作为综合评定不同时段的干旱指标。其表达式为：

$$H = \frac{R}{\overline{R}} \times 100\% \qquad (9.22)$$

式中，R、$\overline{R}$分别为某一时段降水总量及其多年平均值（毫米）。当H＜1时，旱情较重，越小越重，H＞1时则旱情较轻。

（二）干旱的时空分布

春旱指4—5月份发生的干旱。我国牧区春旱分布的一般规律是：南部轻，北部重；东部轻，西部重；山区、高原轻，盆地、平原重。重春旱区主要分布在准噶尔盆地至阿尔泰山南麓、藏北高原西部、青海湖以西至祁连山西段、宁夏平原、鄂尔多斯高原

和阴山中、西部。其它牧区均为中、轻春旱区。春旱指标见表9.18。

表9.18 春旱指标

| 草场类型与年降水量 | | 草场干湿指数（%） | | |
|---|---|---|---|---|
| 草场类型 | 年降水量(毫米) | 重春旱 | 中春旱 | 轻春旱 |
| 荒漠草场 | <150 | <60 | 60—80 | >80 |
| 半荒漠草场 | 150—250 | <55 | 55—70 | 71—80 |
| 草原草场 | 250—400 | <40 | 40—60 | 61—80 |
| 草甸草场 | >400 | <30 | 30—50 | 51—70 |

（引自《中国牧区畜牧气候》）

夏旱指6—8月发生的干旱。根据牧草生长及产量与降水量关系的分析，同样可得牧区夏旱指标。夏旱的分布规律与春旱基本相似。重夏旱区主要分布在阿拉善高原、河西走廊、柴达木盆地及新疆的大部分地方；轻夏旱区分布在黑龙江、吉林、辽宁三省的大部，内蒙古、宁夏、甘肃的部分地方，青藏高原的大部和滇西北、川西牧区；其它地方均为中夏旱区。

如果春旱连夏旱，则称春夏连旱，其危害更加严重。

**三、黑灾及其危害**

黑灾是指冬季降雪少，草场积雪过浅，甚至没有积雪，使牲畜饮水困难而带来的灾害，它实际上是发生于冬季到初春的一种旱害。

黑灾对牧业生产的危害主要是：（1）由于无雪或少雪难以解决家畜饮水问题，使畜群不能进入无水的冬牧场，则无水草场便无法得到充分利用。（2）黑灾严重发生时，无水草场土壤水分也得不到融雪补给，使春季牧草种籽的萌动和返青受到影响。（3）黑灾虽不能造成家畜的大量死亡，但家畜长期缺水生理机能失调，新陈代谢受阻，易引起牲畜掉膘，特别是怀孕母畜在水、草奇缺时，影响胎儿的正常发育。（4）为找水源而长途跋涉，破坏了正常的放牧规律，并为一些传染病的发生与流行提供

了有利条件，使寄生虫对畜的危害程度加重。

黑灾的发生往往与冬、春干旱的发生相一致。黑灾主要发生在冬初气温小于10℃到春季气温回升到0℃这段时间。在黑灾可能发生期内，黑灾是否发生及发生程度，主要取决于连续无积雪日数。根据这一日数，可得黑灾的指标。一般地说，轻黑灾时，连续无积雪日数在20—40天；中等黑灾时为41—60天，重黑灾时为60天以上。

## 四、白灾及其危害

白灾（或雪害）是指由于降雪过大、积雪过深而影响家畜正常活动的一种灾害，其实质是因积雪掩埋牧草而造成的一种家畜“饿灾”。白灾的发生不仅受降雪量、积雪深度、密度和时间的影响，还与草场状况、生产方式及补饲条件等有关。

白灾对家畜的危害，主要在于积雪掩埋草场，牲畜吃不饱或根本吃不上草，而使牲畜瘦弱，孕畜流产，仔畜成活率降低，幼、老、弱畜死亡率增高。此外，积雪过多还会影响家畜放牧和卧盘、妨碍交通、压损棚舍等。

冬、春降雪的多少，是能否形成白灾的前提条件，而积雪掩埋草场的程度是形成白灾的重要因素。因而在确定白灾指标时，应综合考虑冬、春降雪量的多少，不同类型草场的积雪深度和持续时间、积雪密度和草层高度以及各种家畜破雪采食能力等。不同草场类型的白灾指标见表9.19。

## 五、暴风雪、冷雨及其危害

暴风雪和冷雨是指伴有强烈降温和大风的降水天气过程。当降水以雪的形式出现时叫暴风雪，以雨的形式出现时则称冷雨。内蒙牧区常把暴风雪称为白毛风。

暴风雪和冷雨的危害有（1）家畜经受较长时间的雨淋后，雨水渗透毛层，加上剧烈的降温和大风，家畜不能正常采食，畜体内产生的热量减少，消耗的热量增多，破坏了畜体的热量平衡，致使新陈代谢失调，体温下降，表现在弓腰、颤抖、瘫痪，以致

表9.19　白灾指标

| 白灾分级＼项目名称＼指标值 | 草场类型 | 主导指标 | | 辅助指标 | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 积雪深度（厘米） | 积雪掩埋牧草相当于牧草平均高度的百分数（%） | 冬春降雪量相当于历年同期降雪量的百分数（%） | 家畜受害情况 |
| 无白灾 | 高寒草甸草场 | <3 | <30 | <120 | 没有稳定积雪，对各类放牧家畜均无影响 |
| | 草甸草场 | <15 | <30 | | |
| | 草原草场 | <10 | <30 | | |
| | 荒漠、半荒漠草场 | <5 | <30 | | |
| 轻白灾 | 高寒草甸草场 | 3—5 | 30—40 | >120 | 影响牛的放牧采食，对羊的影响尚小，对马的放牧无影响 |
| | 草甸草场 | 15—20 | 20—50 | | |
| | 草原草场 | 10—15 | 30—50 | | |
| | 荒漠、半荒漠草场 | 5—10 | 30—40 | | |
| 中白灾 | 高寒草甸草场 | 6—10 | 40—65 | >140 | 主要影响牛、羊的放牧采食，对马的影响尚小 |
| | 草甸草场 | 20—25 | 50—65 | | |
| | 草原草场 | 15—20 | 50—65 | | |
| | 荒漠、半荒漠草场 | 10—15 | 40—65 | | |
| 重白灾 | 高寒草甸草场 | >10 | >65 | >160 | 各类家畜的放牧均受影影，如果预防不当将造成大批家畜死亡 |
| | 草甸草场 | >25 | >65 | | |
| | 草原草场 | >20 | >65 | | |
| | 荒漠、半荒漠草场 | >15 | >65 | | |

（引自《中国牧区畜牧气候》）

死亡。有些家畜如马畜，当受到冷雨袭击时，还有惊群、跑散等现象，很容易造成丢失与摔死。春季剪毛后的羊只，如遇湿雪或冷雨，由于没有毛的保暖，轻则感冒，重则冻伤或冻死。（2）

怀孕母畜在暴风雪中受惊奔跑，易导致流产。另外，春季家畜饥寒交迫，若遇风雪天气，即使在栅圈内也互相爬跨，挤压取暖，结果瘦弱的孕畜极易流产或被压伤。（3）新生幼畜要求的临界温度高，等热区较窄，产热代谢率低，对剧烈降温和大风非常敏感，加上母畜在风雪天气采食不足、泌乳量少，有的幼畜甚至易嗜污雪和结冰牧草，常引起恶性传染病爆发。特别是恶劣天气的反复出现，将导致新生幼畜死亡率剧增。

暴风雪和冷雨的危害指标为：日平均气温≤5℃，24小时降温≥6℃，日降水量≥5毫米，实测风速≥8米/秒。

暴风雪的分布，一般春季多于秋季，冬、夏两季较少。其主要发生区分布在北部和西部牧区，青藏高寒牧区中部和东部次之，其它各地较少或不发生。

**六、大风、风沙及其危害**

大风是指瞬间风速达到或超过17.0米/秒（或目测估计风力达到或超过8级）的风。风沙系指沙暴，指由于强风将地面尘沙吹起，导致空气混浊，水平能见度小于1000米的一种天气现象。

大风、风沙对畜牧业的危害主要有：（1）危害草场，不但能破坏牧草的形态结构，使之遭受机械损伤，而且沙尘附着在叶面上，影响光合作用和生长发育，草场产量降低，质量变劣，严重时可导致局部地区的草荒。冬、春季节的大风，能刮走大量枯草，搬移沙石，风蚀土壤，掩埋草场，使草原生态系统严重破坏，牧草难以生存。特别是在春季，还能使草场的蒸发量加大，墒情过差，影响人工牧草的播种和天然牧草的正常返青生长。（2）危害家畜健康，造成放牧采食时间缩短，严重时，由于能见度极坏，家畜受惊乱跑，摔伤或吹散丢失，另外，风沙天气易于传播病原体，导致传染病的流行。（3）影响被毛品质，风沙常使沙粒进入家畜毛层，使毛层内的油脂减少，净毛率下降，品质降低。

大风主要分布在我国牧区的北部和西部，一般是西部、北部

多，东部、南部少；平原、沙漠戈壁地区多，丘陵地区少；高山、峡谷多，中、低山区少。从季节上看，则冬、春两季较多，夏、秋两季较少。风沙则主要分布在半荒漠、荒漠地带；在半旱、干旱地带次之；半湿润、湿润地带很少。季节分布与大风相同。

## 参 考 文 献

〔1〕内蒙古农牧学院主编，草原管理学，农业出版社，（1986）。
〔2〕北京农业大学主编，草地学，农业出版社（1982）。
〔3〕中国科学院内蒙宁夏综合考察队，内蒙古自治区及其东西毗邻地区气候与农牧业的关系，科学出版社，（1976）。
〔4〕中国牧区畜牧气候区划科研协作组，中国牧区畜牧气候，气象出版社，（1988）。
〔5〕黄昌澍，家畜气候学，江苏科学技术出版社，（1989）。
〔6〕西北农学院主编，家畜生态学，河南科学技术出版社，（1986）。
〔7〕J.Seemann等，农业气象学（亓来福等译），气象出版社，（1984）。
〔8〕M.L.Esmay著，牲畜环境原理（王志培等译）；中国农业机械出版社，（1983）。
〔9〕朱履宽、刘树泽，国外畜牧气象研究概况，气象科技，（1），（1985）。
〔10〕冯秀藻、闵庆文，近几年国内外畜牧气象研究的主要进展，畜牧气象文集，气象出版社，（1990）。
〔11〕中国科学院内蒙古草原生态系统定位站编，草原生态系统研究，第1集(1985)、第2集（1988）、第3集科学出版社。（1988）。
〔12〕G.F.Byrne,et al,Fitting a growth curve equation to field data, Agric.Meteorol.,22, (1980).
〔13〕S.J. Reddy, et al,A Simple method for the estimation of potential primary pasture productivity over Mozambique, Agric.Meteorol.,39, (1987).
〔14〕J.A.Dyer,et al.,climatic simulator field-drying hay,Agric.Meteorol, 18, (1977).
〔15〕闵庆文，几种用于牧草气象研究的农业气象模式介绍，国外农学——农业气象、（1），（1990）。
〔16〕H.D.Johnson等，气候与家畜生产力（张晓岚等译），国外农学——农业气象，2（附刊），（1989）。

〔17〕张谊光，青藏高原畜牧气候，自然资源，（3），（1985）。
〔18〕张传道等，内蒙古天然牧草生长发育与气象条件关系的分析，农业气象，(4)，(1986)。
〔19〕黄文秀等，西藏高原家畜生态分布特征与规律的研究，自然资源，（2），(1980)。
〔20〕姚崙旦，天气、气候与畜禽疾病的关系，农业气象，（1），（1984）。
〔21〕王莩，畜牧气象若干问题的探讨，农业气象，（4），（1981）。
〔22〕鲁作民等，旱生植物绿色组织水分状况的研究，植物生理学通讯，（4），(1980)。
〔23〕E.N.Hectepo Ba，土壤干旱对于春小麦穗中干物质聚积和水分状况的影响，植物生理学通讯，（1），（1955）。
〔24〕B.Baier，作物-产量模式中的水分平衡，国外农学——农业气象，(3)，(1983)。
〔25〕A.Pande，土壤湿度的测定法，国外农学——农业气象，（2），（1983）。
〔26〕Magalhaes,A.A，水分应力对豆类产量的影响；国外农学——农业气象，(4)，(1983)。
〔27〕辽宁锦州市气象台农业气象研究室，锦州土壤水分变化规律的探讨，气象科技，农业气象附刊，（1977）。
〔28〕Ran,H.,Effect of depth and composition of underground water and mulchng on salt accumulation and yield of maize and wheat Soil Sci. 29(4),(1981).
〔29〕Bharadwaj,V., Note on the effect of iMigation water containing boron application at different grauth stages of wheat Soil Soi. 29 (4), (1981).
〔30〕Westgate M,E.,Carbohydrate reserves and reproductive development at low leaf water Potentials in maize,Crop Sci., 25(5), (1985).